

Disipadores de energía - parte II: pozo y estanque amortiguador

Rafael Pardo Gómez email: 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 segundo 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 segundo artículo es una presentación detallada acerca de dos estructuras de disipación de energía que tienen un amplio uso universal: el estanque y el pozo amortiguador.

Palabras clave: dientes deflectores, dados amortiguadores, estanque amortiguador, longitud del estanque/pozo, pozo amortiguador, salto hidráulico, umbral terminal.

Energy dissipation- part II: stilling basin

ABSTRACT

The present article is the second of a series of seven, all relative to 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 second article is a detailed presentation about two structures of energy dissipation that have a wide universal use.

Keywords: chute blocks, baffle piers, stilling basin, stilling basin/pool length, stilling pool, hydraulic jump, terminal threshold.

INTRODUCCIÓN

El pozo amortiguador es una estructura empleada para contener el salto hidráulico, de manera que el verdadero disipador es el salto y la estructura además de soportar las solicitaciones que provoca el salto sobre el elemento en el que se desarrolla, garantiza que se logre la máxima eficiencia posible del disipador y garantiza que el mismo se produzca dentro de ella (Pardo y Alegret 2012), (Pardo 2017).

CARACTERÍSTICAS GENERALES

El cálculo de un pozo amortiguador se basa fundamentalmente en la obtención de la altura h del escalón del pozo (ver figura 1) capaz de garantizar que la conjugada del tirante que se tiene al inicio del pozo, coincida con el tirante de que se dispone aguas abajo de éste, para de esa manera lograr la ocurrencia del salto hidráulico al pie del cimacio o a la salida de la rápida, según sea el caso. Una vez determinada esta altura se procederá a calcular la longitud de revestimiento de dicho pozo. (Agroskin 1964), (Kiceliiov 1961).

En el cálculo de un pozo amortiguador es importante tener presente que:

1. La condición fundamental para ejecutar el cálculo de un pozo amortiguador es que $y_2 > y_3$. Recuérdese que y_2 es la profundidad conjugada del salto.
2. Es frecuente usar como criterio para el cálculo de la altura del pozo que en el mismo se imponga una profundidad ligeramente mayor que la conjugada y_2 , es decir, ahogar algo al salto para con ello mejorar su eficiencia atendiendo a criterios que se mencionan más abajo, ello se logra multiplicando y_2 por un factor de seguridad η que oscila entre 1,00 y 1,10. Ello implica que $TA = \eta y_2$.

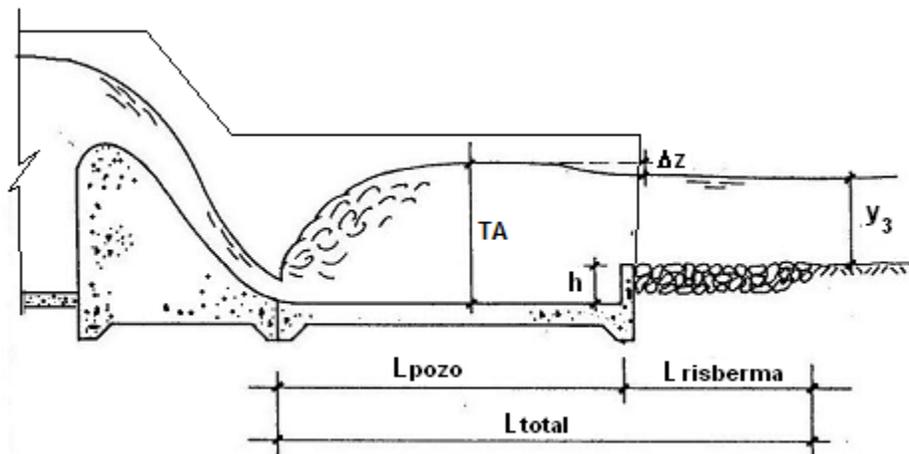


Figura 1 – Esquema de pozo amortiguador ubicado al pie del cimacio vertedor

En relación con la selección del valor de η , atendiendo a criterios prácticos se recomienda lo siguiente:

- Para $F_{r1} < 4,5$ se recomienda $\eta = 1,1$. Téngase en cuenta que para esta condición el salto es oscilante, por lo que con un ahogo del 10% se está disminuyendo el oleaje que se genera en ese tipo de salto.

- Para $4,5 < F_{r1} < 9,0$ se recomienda $\eta = 1,0$. Este es el caso de un salto estable que por su buen funcionamiento y posición, no requiere de factor de seguridad.

- Para $F_{r1} > 9,0$ se recomienda $\eta = 1,05$ para fijar la ubicación del salto dentro del pozo, dada la tendencia de estos saltos fuertes a correrse hacia aguas abajo.

3. Inmediatamente aguas abajo del pozo amortiguador se reviste el canal de salida, generalmente con rocas, con el fin de evitar que eventuales excesos de energía del flujo de salida vayan a producir erosiones no previstas en esa zona del canal; a este tramo del canal de salida se le denomina risberma. Más adelante se ampliará sobre este aspecto.

4. En los aliviaderos puede ubicarse un pozo amortiguador inmediatamente a continuación del cimacio vertedor cuando el mismo se encuentra en un nivel cercano al del cauce del río al cual se restituyen las aguas, o a continuación de la rápida cuando el empleo de la misma fuera imprescindible debido a que aún no se habría llegado a los niveles del cauce del río en la zona de la descarga. Por esta razón, se presentan a continuación ambos casos siguiendo un orden lógico de los pasos a dar.

CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UN POZO AMORTIGUADOR UBICADO AL PIE DE UN CIMACIO VERTEDOR

Se recomienda seguir el orden siguiente en los cálculos:

1- Cálculo del tirante contraído al pie del cimacio y_1

Se realiza mediante el empleo de las ecuaciones (1), (2) y (3).

$$h_{ci} = E_{ei}/3 [1 - 2 \cos(60^\circ + \alpha^\circ/3)] \quad (1)$$

donde:

$$E_{ei} = P_1 + H_{ei} \quad (2)$$

$$\alpha_1^\circ = \arccos[1 - (0,83q_i/\varphi)^2 E_{ei}^{-3}] \quad (3)$$

donde:

φ : coeficiente de velocidad que varía en función de la altura del cimacio, aceptándose un valor entre 0,95 y 1,00 para los cimacios de perfil práctico de pequeña altura.

2- Cálculo de la conjugada y_2 del tirante y_1 con la ecuación (4) y considerando la velocidad de llegada V_1 según ecuación (5).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{8F_{r1}^2 + 1} - 1 \right] \quad (4)$$

$$V_1 = \frac{Q}{bY_1} \quad (5)$$

donde: $b = L_t$: b es el ancho del pozo amortiguador y L_t es la longitud total del vertedor.

3- Comparar y_2 con y_3 para valorar si es necesario o no el uso del pozo.

- a) Si $y_2 < y_3 \Rightarrow$ el salto está ahogando al vertedor y es aconsejable bajar la solera para evitarlo.
- b) Si $y_2 = y_3 \Rightarrow$ debe emplearse estanque o simplemente la solera, según se analizará más adelante.
- c) Si $y_2 > y_3 \Rightarrow$ sí se puede emplear un pozo.

4- En caso de requerirse pozo amortiguador, calcular la altura del escalón del pozo (h).

Se recomienda organizar los cálculos usando un formato de tabla como el siguiente:

h_{sup} (m)	E_o (m)	θ°	y_1 (m)	y_2 (m)	ΔZ (m)	h_{calc} (m)	error relativo
1	2	3	4	5	6	7	8

Procedimiento a seguir:

- a) Suponer un valor de altura del pozo (h_{sup})
- b) Calcular la energía al nivel del fondo del pozo $E_o = H_o + (P^* + h_{sup})$
- c) Calcular $\theta (= \alpha)$
- d) Calcular y_1
- e) Calcular y_2
- f) Calcular ΔZ según ecuación (6):

$$\Delta Z = \frac{V_{can.sal.}^2}{2g\varphi_p^2 y_3^2} - \frac{V_{pozo}^2}{2g\eta^2 y_2^2} \quad (6)$$

donde:

$\varphi_p = (0,80 \div 0,95)$: coeficiente que considera las pérdidas por el escalón del pozo, siendo 0,80 a escalón de borde recto y 0,95 a escalón con borde redondeado.

La velocidad en el canal de salida se determina en la sección final del pozo pues más adelante se indefinire la sección debido a los remolinos laterales que hacen que el flujo se concentre en el eje del canal.

$$V_{can.sal.} = \frac{Q}{by_3} \quad (7)$$

donde: y_3 : tirante en el canal de salida.

$$V_{pozo} = \frac{Q}{b\eta y_2} \quad (8)$$

siendo:

b : ancho del pozo

y_2 : 2^{da} conjugada del salto en el pozo

g : aceleración de caída libre

η : factor de seguridad ya definido

g) Calcular h_{calc} según ecuación (9)

$$h_{calc} = \eta y_2 - (y_3 + \Delta Z) \quad (9)$$

h) Calcular el error por la diferencia entre h_{sup} y h_{calc} según ecuación (10)

$$Error(\%) = \left| \frac{h_{sup} - h_{calc}}{h_{calc}} \right| 100 \quad (10)$$

Se debe cumplir que el Error Relativo $< 2\%$, de no ser así, se procede a suponer un nuevo valor de (h). Resulta aconsejable aceptar, como nuevo valor de h_{sup} , el valor de la h_{calc} obtenida en el paso anterior. Este proceso se repetirá hasta cumplir con el requisito mencionado en el inciso h.

5- Cálculo de la longitud del pozo (L_p) y de la longitud de la risberma (L_r).

$$\text{Si el gasto específico en el pozo } q > 5 \text{ m}^2/\text{s}: L_p = 0,8L_{SH} \quad (11a)$$

$$\text{Si } q < 5 \text{ m}^2/\text{s}: L_p = 3y_2 \quad (11b)$$

$$L_r = 9(y_2 - y_1) - L_p \quad (12)$$

CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UN POZO AMORTIGUADOR UBICADO AL PIE DE UNA RÁPIDA

En el cálculo de un pozo amortiguador que se ubica al final de una rápida, se pueden presentar fundamentalmente dos casos que están relacionados con el régimen de circulación que se tenga al final de la misma, por ejemplo, si al final de la rápida se alcanza el régimen uniforme en el cálculo del pozo amortiguador no es necesario iterar para definir la cota de fondo del pozo, pues el tirante que se obtendrá al inicio del pozo será siempre el mismo, independientemente de la

cota de fondo que éste requiera. Ahora bien, si por el contrario el régimen de circulación al final de la rápida no es uniforme, entonces al calcular el pozo amortiguador, se deberá tener presente que en la medida en que se varía su cota de fondo es necesaria la prolongación de la rápida, razón por la cual el tirante entonces varía.

Este último aspecto evidencia la necesidad de prolongar el cálculo de la curva superficial del flujo que circula por la rápida, más allá de donde se prevea inicialmente que finalizará ésta, con el propósito de contar con la información necesaria para acometer el diseño del pozo amortiguador.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. A partir de la curva superficial de la rápida se conoce el tirante al final de ésta, el cual resulta ser a los efectos del cálculo del pozo amortiguador, el tirante a la entrada del mismo y_1 , entonces se procede a calcular el tirante conjugado y_2 mediante las ecuaciones (4) y (5), teniendo en cuenta que ahora el ancho del pozo es igual al ancho b de la rápida.
2. Comparar y_2 con y_3 para valorar si es necesario o no el uso del pozo, teniéndose una de tres opciones:
 - a) Si $y_2 < y_3 \Rightarrow$ el salto está desarrollándose en la rápida, lo cual no es admisible. Deberá modificarse la misma para evitarlo, cambiando su ancho y/o su pendiente.
 - b) Si $y_2 = y_3 \Rightarrow$ debe emplearse estanque o simplemente una solera, según se analizará más adelante
 - c) Si $y_2 > y_3 \Rightarrow$ sí se puede emplear un pozo
3. En caso de requerirse pozo amortiguador se procede al cálculo de la altura del escalón del pozo (h).

Se sigue el mismo procedimiento que para el pozo al pie del cimacio, con la diferencia de que en el presente caso se toma el tirante de llegada al pozo y_1 como el correspondiente al final de la rápida y en las aproximaciones sucesivas hasta lograr el error admisible, los valores del mencionado tirante se tomarán de la curva superficial prolongada.
4. Cálculo de la longitud del pozo (L_p) y de la longitud de la risberma (L_r).

Se procede de la misma forma que se indicó para el salto al pie del cimacio.

Por último, en relación con el cálculo de un pozo amortiguador ubicado al pie de una rápida, en donde se ha alcanzado el régimen de circulación uniforme y por lo tanto el tirante y_1 no varía independientemente de la cota a la que se ubique el fondo del pozo a medida que la rápida avanza hacia aguas abajo, no es necesario realizar la iteración.

EL ESTANQUE AMORTIGUADOR COMO DISIPADOR DE ENERGÍA: PRINCIPIO DE DISIPACIÓN

La disipación de la energía a través del uso de un estanque amortiguador, se realiza al igual que en el pozo por medio de la ocurrencia de un salto hidráulico con la única diferencia de que, en este tipo de disipador, se incorporan distintos accesorios tales como dientes deflectores, dados

amortiguadores y umbral final, con dos propósitos: el primero es incrementar la disipación de la energía, mientras el segundo es contribuir con la estabilización del salto en el estanque ya que al tener esta estructura la misma cota de fondo del canal de salida, el salto tiende fácilmente a correrse hacia aguas abajo y salirse del estanque (Peterka 1984).

Diferencias fundamentales entre el estanque y el pozo amortiguador

Entre las diferencias fundamentales que se pueden señalar respecto a estos dos tipos de disipadores se tiene que:

1. En el estanque amortiguador, la cota de fondo del canal de salida se hace coincidir con la cota de fondo del estanque. Esta situación contribuye en numerosas ocasiones en la decisión final acerca del tipo de disipador a emplear, pues como es de suponer, cuando se tenga un canal de salida muy largo, la obligatoriedad de colocar la cota de fondo del canal de salida al mismo nivel que la del estanque, hace que frecuentemente el empleo de este último resulte más costoso que el uso de un pozo como disipador de la energía debido al gran movimiento de tierra que habría que realizar.
2. En el estanque se emplean accesorios, con el propósito de incrementar la disipación de la energía y estabilizar el flujo antes de abandonar dicha estructura.
3. La presencia del escalón al final del pozo hace que en la superficie del agua se presente una caída ΔZ cuyo valor no es despreciable; en el caso del estanque tal caída es muy pequeña o no existe.

En la figura 2 se aprecian las diferencias arriba descritas.

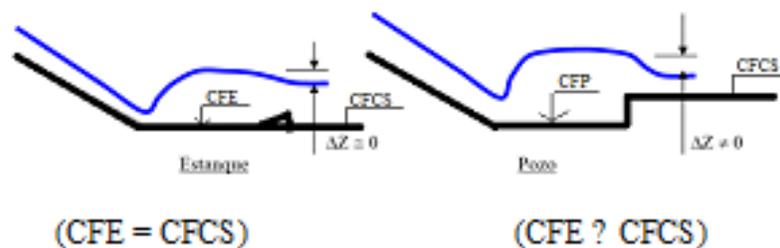


Figura 2 – Diferencias entre estanque y pozo

Tipos de accesorios que se emplean en el estanque amortiguador: funciones

Entre los accesorios que se utilizan en el estanque amortiguador se tienen los siguientes:

- a) Dientes deflectores
- b) Dados amortiguadores
- c) Umbral terminal.

a) Dientes deflectores

Son aquellos elementos que se ubican a la entrada del estanque, para fragmentar el chorro e incrementar la profundidad del flujo que entra a dicha estructura. Además se puede señalar que su presencia contribuye a crear la turbulencia requerida en la disipación de la energía y como resultado de esto se pueden obtener longitudes de estanques más cortas.

b) Dados amortiguadores

Los dados amortiguadores son instalados en el estanque principalmente para estabilizar la formación del salto hidráulico e incrementar la turbulencia del flujo, con lo cual se logra una mejor disipación de la energía. Es importante resaltar que cuando por el aliviadero circulan gastos pequeños, los dados contribuyen a compensar las deficiencias del tirante aguas abajo, mientras que para gastos grandes de circulación, ellos ayudan a reflejar el flujo alejado del lecho del río.

Cuando la velocidad a la entrada del estanque excede los 15 m/s no se recomienda su uso ya que se corre el peligro de que ocurra la cavitación en la cara posterior de ellos. Para evitar esta situación, los dados pueden ser colocados lo suficientemente lejos de la entrada, donde exista suficiente sumersión bajo el tirante aguas abajo.

Una de las dimensiones más importantes en el dado amortiguador resulta ser su altura pues si la misma es demasiado grande se produciría una cascada y si por el contrario es muy baja puede resultar una superficie rugosa y no cumplir con su objetivo de diseño o colocación.

c) Umbral Terminal

Es aquel umbral que se construye al final del estanque con el propósito de controlar la erosión que se producirá en el lecho del río. Las pruebas de laboratorio indican que este elemento terminal, incrementa la eficiencia del estanque pues reduce apreciablemente la erosión del cauce aguas abajo.

En la figura 3 se muestran varios tipos de dados de uso más frecuente en el estanque amortiguador. Se aprecian también, al inicio del estanque, los dientes deflectores y al final el umbral terminal.

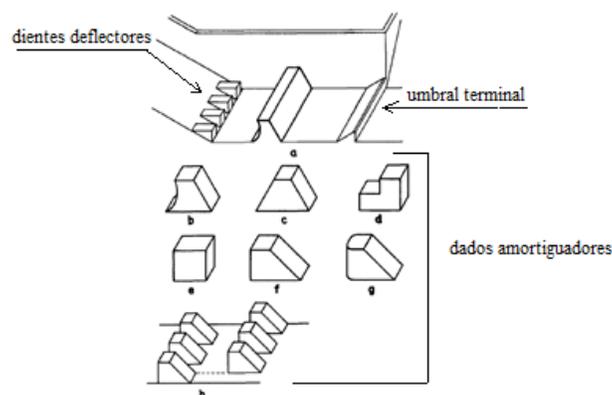


Figura 3 – Accesorios ensayados para estanques [Fuente: Peterka (1984)]

Estanques Amortiguadores típicos recomendados en soleras horizontales

Ha sido posible tipificar el diseño de estanque amortiguadores para todos los tipos de saltos hidráulicos según la clasificación de estos en función del número de Froude, la cual fue presentada más arriba en el presente texto. A continuación se presentan las soluciones para cada caso.

$$Fr_1 < 1,7$$

$$\text{En este caso se cumple que } D_2 \approx 2D_1 \quad (13)$$

$$V_2 \approx 0,5V_1 \tag{14}$$

No es necesario emplear estanque, sólo se requiere revestir el canal en una longitud $L = 4D_2$ a partir de la sección donde comienza el cambio de tirante (inicio del salto).

$$1,7 < F_{r1} < 2,5$$

En este caso se emplea el estanque tipo 0. No se requiere el uso de accesorios. La longitud del estanque coincide con la longitud del salto (dada en la figura 4) y la profundidad del agua en el estanque se hace coincidir con la conjugada ($TA = D_2$), de manera que la cota del fondo del estanque será:

$$CFE = CFCS + D_3 - TA \tag{15}$$

en la que:

$CFCS$: cota del fondo del canal de salida

D_3 : profundidad del agua impuesta por las condiciones de aguas abajo.

Varios autores plantean que para $F_{r1} < 2,5$ no se emplea estanque, sino que se reviste el canal en una longitud igual a la del salto.

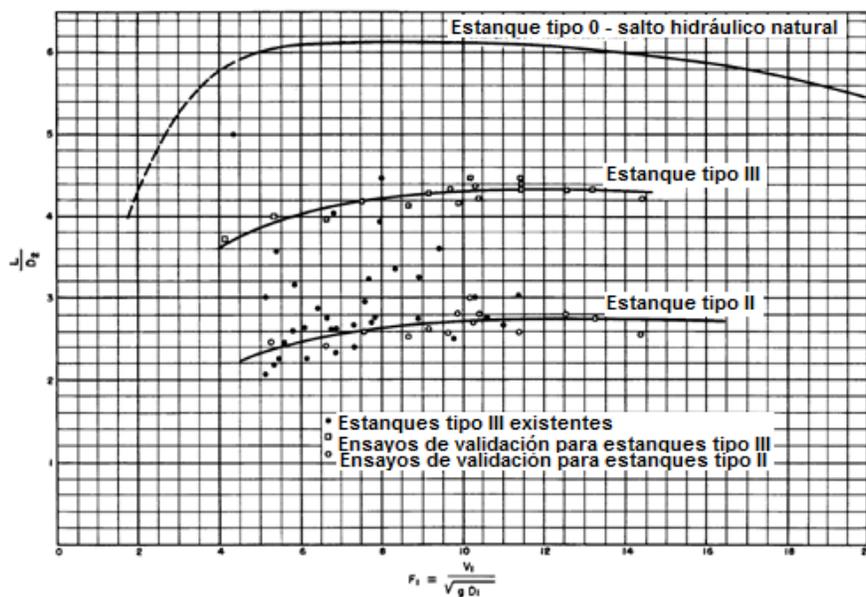


Figura 4 – Longitud del estanque para los tipos 0 (también para el I), II y III
[Fuente: Peterka (1984)]

Una alternativa a la figura 4 es la ecuación (16) con sus parámetros en la tabla 1.

$$L/D_2 = a + b/F_r + c/F_r^2 + d/F_r^3 + e/F_r^4 + f/F_r^5 + g/F_r^6 + h/F_r^7 + i/F_r^8 + j/F_r^9 \tag{16}$$

Observación: de los parámetros de la tabla 1 no deben eliminarse cifras significativas, pues pudieran alterarse sensiblemente los resultados.

$$2,5 < F_{rI} < 4,5$$

En este caso se emplea el estanque tipo I que se presenta en la figura 5. Según se describió al inicio de este capítulo, el principal problema concierne a la generación de olas generadas por el salto inestable, haciendo que la inclusión de un supresor de olas forme parte del diseño del estanque amortiguador.

La mejor manera de combatir un problema de oleaje es eliminarlo en su fuente de origen alterando las condiciones que lo generan. Para estanques amortiguadores precedidos por un vertedor o una rápida, dos esquemas aparentan estar claros para eliminar la ola en su fuente; el primero es rompiendo el chorro de entrada oponiéndole chorros direccionales ocasionados por dados amortiguadores o umbrales. El segundo es intensificando los remolinos en la superficie del agua con la ayuda de grandes dientes deflectores que generen chorros direccionales.

Tabla 1 - Parámetros para la ecuación 16

Parámetros	Estanque tipo 0	Estanque tipo II	Estanque tipo III
a	-6,654121797	-256,2759295	134,0670786
b	628,1651943	20748,18362	-9314,120983
c	-13389,44098	-720111,2815	287898,4347
d	161063,2685	14209616,94	-5039114,237
e	-1196506,076	-175701440,9	55168180,66
f	5674202,316	1412502341	-392627134,4
g	-17178498,37	-7388745315	1819849296
h	32051491,18	24273978640	-5306089808
i	-33496444,65	-45493851017	8843671360
j	14966466,43	37099793125	-6427780992

El primer método es impracticable debido al alto número y tamaño de los accesorios a colocar, los cuales obstruirían el flujo de agua. El segundo esquema dio buenos resultados. Mediante múltiples estudios en laboratorio ha sido posible establecer el estanque amortiguador tipo I a emplear para el intervalo de F_{rI} especificado.

En cuanto al tirante después del salto TA , se ha podido comprobar que el salto hidráulico es muy sensible a las variaciones de TA para este intervalo de valores de Froude, llegando a ocurrir que ligeras variaciones de TA hacia valores menores pueden provocar que el salto tenga lugar fuera del estanque. Para garantizar la posición del salto y para contribuir de manera adicional a la supresión del oleaje, se recomienda que $TA = 1,1 D_2$, dicho en otras palabras: el salto hidráulico es ahogado un 10%.

Resumiendo:

$$TA = 1,1D_2 \quad (17)$$

La cota del fondo CFE del estanque se determina según:

$$CFE = CFCS + D_3 - TA \quad (18)$$

Mientras que la longitud del estanque se determina según:

$$L_I = L_{SH} \text{ se obtiene en la figura 4 o mediante la ecuación (16).}$$

Las demás dimensiones se especifican en la figura 5.

$$F_{r1} > 4,5 \text{ y } V_1 < 15 \text{ m/s}$$

En este caso se emplea el estanque tipo II que resulta un estanque más corto con umbral terminal sencillo pues se le incorporan dados amortiguadores aguas abajo de los dientes deflectores que lleva al inicio.

Debido a la posibilidad de producirse bajas presiones en la cara posterior de los citados dados y la posible cavitación de los mismos, la velocidad de entrada del flujo y el gasto específico deben limitarse a valores razonables ($V < 15 \text{ m/s}$).

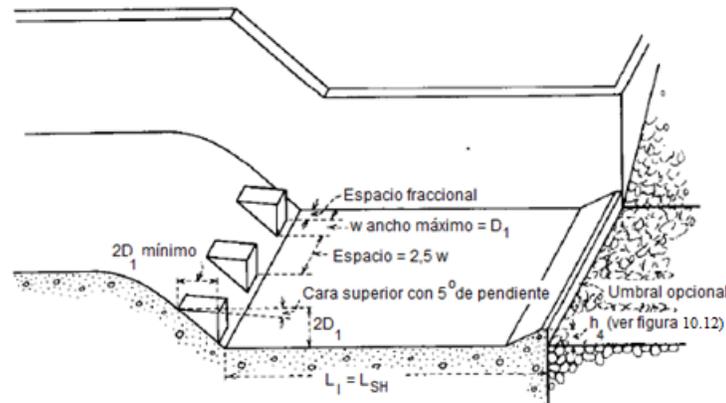


Figura 5 – Estanque amortiguador tipo I para $2,5 \leq F_{r1} \leq 4,5$
[Fuente: Peterka (1984)]

Después de múltiples ensayos con varias variantes de dados amortiguadores como los presentados más arriba, también fueron ensayadas variantes en el tamaño y forma de los dientes deflectores y del umbral terminal.

Se encontró que los dientes deflectores pueden hacerse menores, no mayores que D_1 , si es posible, para evitar que dichos dientes lancen el chorro de entrada por encima de los dados amortiguadores. El umbral terminal tiene poca influencia sobre el salto cuando los dados son colocados en la forma recomendada.

En consecuencia, no es necesario un umbral dentado y basta un umbral terminal sencillo con el único propósito de direccionar las remanentes corrientes de fondo en el estanque hacia arriba y fuera del estanque, esto es, hacia el canal de salida. El estanque finalmente desarrollado se muestra en la figura 6.

De esta figura, los valores de h_3 y h_4 también se pueden calcular por:

$$h_3 = 0,627 + 0,167F_{r1} \quad (17)$$

$$h_4 = 1,02 + 0,055F_{r1} \quad (18)$$

Consideraciones de Peterka y algunas adicionales del autor del presente texto para el empleo del estanque amortiguador tipo II:

1. El estanque opera mejor para tirante aguas abajo según ecuación (19)

$$TA = D_2 \quad (19)$$

2. La longitud del estanque, la cual es menor que la mitad de la longitud del salto hidráulico natural, se puede obtener a partir de la figura 4 o la ecuación alternativa (16).
3. La cota del fondo del estanque se determina por:

$$CFE = CFCS + D_3 - TA \quad (20)$$

4. El estanque tipo II puede ser efectivo para valores de F_{r1} tan bajos como 4, pero se sugiere emplearlo a partir de $F_{r1} > 4,5$.
5. La altura, ancho y espaciamiento de los dientes deflectores debe ser igual a la profundidad media del flujo de entrada D_1 . El ancho de los dientes puede reducirse, asegurando que el espaciamiento entre ellos se reduzca en igual magnitud. En caso que $D_1 < 20$ cm la altura de los dientes debe ser $h_1 = 20$ cm.

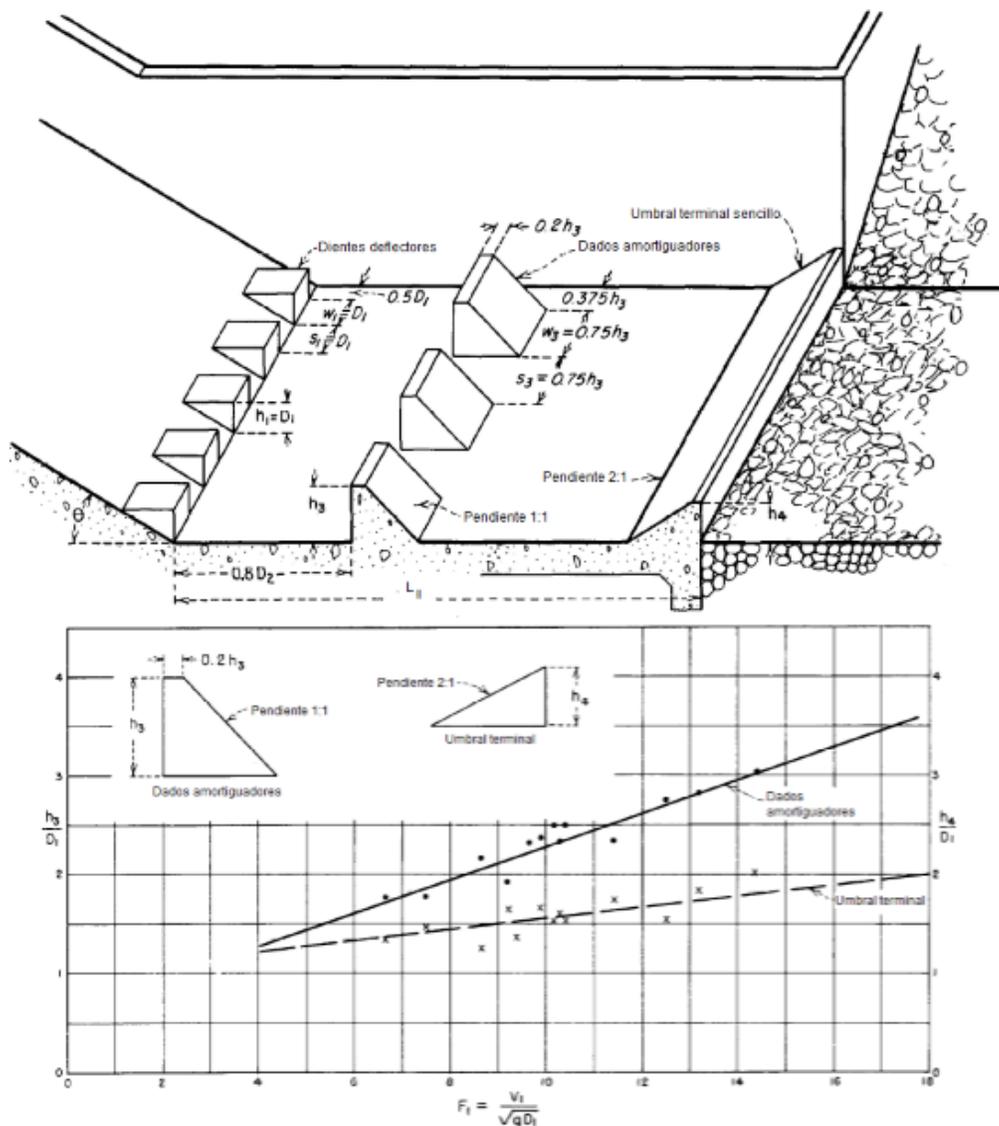


Figura 6 – Estanque amortiguador tipo II para $F_{r1} > 4,5$ y $V_1 < 15$ m/s
 [Fuente: Peterka (1984)]

6. La altura y el espaciamiento de los dados amortiguadores varía con el F_{r1} según se muestra en la figura 6. Los dados pueden ser cubos o con la forma mostrada en dicha figura; la cara de aguas arriba debe ser vertical y plana. La cara vertical es muy importante. Para estructuras muy estrechas (poco ancho del estanque) en los que el ancho y espaciamiento de los dados lleve a valores poco prácticos, ambos pueden ser reducidos, pero garantizando que se mantengan iguales entre sí. Se recomienda espaciamiento en los extremos (adyacentes a las paredes laterales) igual a la mitad del espaciamiento.
7. La cara de aguas arriba de los dados amortiguadores debe colocarse a una distancia $0,8D_2$ desde la cara de aguas abajo de los dientes deflectores. Esta distancia es importante respetarla.
8. La altura del umbral terminal se da en la figura 6.
9. Es indeseable redondear las crestas de los dientes deflectores, dados amortiguadores y umbral terminal. El redondeo de los dados amortiguadores puede llevar a reducir su eficiencia a la mitad. Pequeños biselados de los bordes pueden hacerse para evitar la fractura de los mismos.
10. Como regla general, la pendiente de la rápida o del cimacio que preceden al estanque tiene poco efecto en el salto hidráulico, a menos que rápidas de pequeña pendiente estén implicadas. Este caso se tratará más adelante.

$$\underline{F_{r1} > 4,5 \text{ y } V_1 > 15 \text{ m/s}}$$

Los estanques tipo III han sido usados en presas de hormigón altas, en el aliviadero de presas de tierra y en estructuras de grandes canales. El estanque contiene dientes deflectores al inicio y umbral dentado al final. Ver la figura 7. No se emplean dados amortiguadores debido a las altas velocidades del flujo de entrada al estanque, las que pondrían en peligro a dichos dados por la posible cavitación en la cara posterior de los mismos.

Recomendaciones de Peterka para el empleo del estanque tipo III:

1. La determinación de la cota del fondo del estanque debe considerar el tirante de aguas abajo TA incluyendo un margen de seguridad de 5%, es decir, $TA = 1,05 D_2$.
2. El estanque tipo III puede ser efectivo para valores inferiores de F_r hasta 4; sin embargo por razones de seguridad se recomienda su empleo para $F_r > 4,5$.
3. La longitud del estanque puede obtenerse de la curva intermedia de la figura 4 o mediante la ecuación (16).
4. La altura de los dientes deflectores es igual a la profundidad de llegada D_1 , su ancho y espaciamiento debe ser aproximadamente igual a su altura; sin embargo, este último debe variarse para evitar dientes fraccionales. El espaciamiento entre los muros laterales y el primer diente de cada lado del estanque debe ser igual a $D_1/2$ para evitar salpicaduras y mantener presiones aceptables.

5. La altura del umbral terminal dentado es igual a $0,2D_1$ mientras el máximo ancho y el espaciamiento recomendados son aproximadamente $0,15D_1$ cada uno. Es recomendable que los dientes extremos de ambos lados queden pegados a los muros laterales. La pendiente de la porción continua es 2:1. Para estanques estrechos, que contienen solo unos pocos dientes de acuerdo con las recomendaciones anteriores, es aconsejable reducir el ancho y el espaciamiento, aunque los anchos y espaciamientos deben permanecer iguales entre sí. Esta reducción de ancho y espaciamiento para estanques estrechos mejora el comportamiento de los mismos; por tanto, el ancho y espaciamiento mínimo viene dado por consideraciones estructurales.
6. No es necesario colocar a tresbolillo los dientes deflectores respecto al umbral dentado. De hecho, esta práctica no es aconsejable desde el punto de vista constructivo.
7. Los ensayos de validación del estanque tipo III no mostraron cambios perceptibles en el mismo con respecto a la pendiente de la rápida precedente o el talud del cimacio, según sea el caso. En dichos ensayos tal pendiente varió entre 0,6:1 a 2:1. Posteriormente, se comprobó que la referida pendiente incide en el salto hidráulico cuando su valor es muy cercano a la horizontal. Este asunto es analizado con más detalle en la sección relativa a soleras con pendiente.

Siguiendo las recomendaciones arriba presentadas se logran diseños seguros y conservadores de estanques amortiguadores para aliviaderos de hasta 60 metros de altura (distancia vertical entre la superficie del agua en el embalse y el terreno en la zona de descarga del aliviadero) y gasto específico en el estanque hasta $50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, garantizando que la entrada del chorro de agua al estanque - en lo referido a profundidad D_1 y velocidad V_1 - sea razonablemente uniforme.

Para mayores alturas de caída, mayores gastos específicos o posibles asimetrías, es recomendable la realización de estudios en modelos físicos a escala reducida para el correcto diseño hidráulico del disipador.

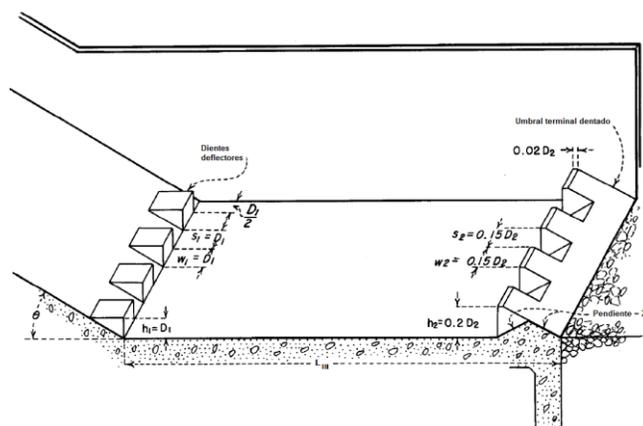


Figura 7– Estanque amortiguador tipo III para $F_{r1} > 4,5$ y $V_1 \geq 15 \text{ m/s}$
[Fuente: Peterka (1984)]

CONCLUSIONES

- El estanque y el pozo amortiguador son estructuras confiables para su empleo como disipadores de energía.
- Las diferencias entre estanque y pozo siempre deben tenerse en cuenta antes de realizar la selección de uno u otro y no se ha identificado un criterio que establezca una ventaja predominante de uno respecto al otro.
- Las principales herramientas para el diseño hidráulico de estanques y pozos amortiguadores que se han recopilado a partir de la literatura especializada y 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 los presentes trabajos.

REFERENCIAS

Agroskin I. I. (1964). “Hidráulica” (en ruso), Editorial “Energía”, Moscú.

Kiceliyov P. C. (1961) “Manual de Cálculos Hidráulicos” (en ruso), Editorial Energía, Moscú.

Pardo R. (2017). “Monografía sobre disipadores de energía”. ISBN: 978-959-261-565-6. Departamento de Ediciones CUJAE, La Habana, Cuba.

Pardo R. y Alegret E. (2012). “Diseño hidráulico de aliviaderos y obras de toma para presas”, Editorial Félix Varela, ISBN 978-959-07-1692-8, La Habana

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.