

PÉRDIDA DE ENERGÍA Y TENDENCIA A LA CAVITACIÓN EN VERTEDEROS ESCALONADOS

María C. Lopardo, Jorge D. Bacchiega, Claudio A. Fattor y Raúl A. Lopardo

Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina
C.C. 21 (1802) Aeropuerto Ezeiza, Ezeiza. Tel/Fax: 011-4480-4500, e-mail: jbacchi@ina.gov.ar

RESUMEN

En una anterior publicación se presentó un estudio acerca del “estado del arte” en el diseño y construcción de vertederos escalonados, tomando en consideración su notable grado de preferencia en el mundo para servir como sistema de alivio de presas construidas con hormigón compactado a rodillo. En esa oportunidad se dejaron abiertos como temas de investigación y desarrollo dos aspectos fundamentales: a) la pérdida efectiva de energía a lo largo del vertedero y su influencia en la disminución de la longitud de cuenco amortiguador y b) el problema del caudal específico máximo, limitado por la mayor parte de los autores a no más de $25 \text{ m}^2/\text{s}$, en virtud de que con las técnicas clásicas de predicción para valores más elevados podrían presentarse daños por cavitación.

En el tiempo transcurrido otros autores han desarrollado experiencias que permiten acercar información acerca de la pérdida de energía sobre vertederos con pendientes 1:1 y 1:0,75, pero por la metodología de determinación utilizada se requiere su confirmación experimental más precisa. Por otra parte, en la bibliografía ya existen ejemplos de presas reales cuyos aliviaderos en escalones sufrieron crecidas de caudales específicos varias veces superiores al límite supuesto sin sufrir el menor daño por cavitación.

En virtud de lo expuesto, y ante la posibilidad de que en Argentina se proyecte el primer vertedero de este tipo, se considera importante presentar un ejemplo práctico de aplicación del método de diseño clásico, que permite ilustrar el tema con valores numéricos, dando como resultado una obra que cumple con todas las condiciones de los actuales criterios de proyecto.

Por otra parte, entendiendo que las nuevas experiencias de laboratorio y observaciones de prototipo hacen pensar que las condiciones impuestas para el diseño de vertederos escalonados son exageradamente conservadoras, se presenta un proyecto de investigaciones experimentales que se estima podrá contribuir a extender los criterios a casos que exceden los límites actuales.

Palabras clave: Vertederos, cavitación, disipación de energía, aliviaderos

INTRODUCCIÓN

El uso de escalones para disipar energía en la caída de vertederos o canales de muy fuerte pendiente no es precisamente una idea moderna. Tal como se describe en la bibliografía del tema (Chanson et al. 2002), el vertedero escalonado más antiguo que actualmente existe corresponde a la presa de Akarnanian (Grecia), de 10.50 m de altura, 25 m de ancho, pendiente media 1:1 y escalones que van desde 60 cm a 90 cm de altura, cuya construcción data aproximadamente del año 1300 A.C.

Se tiene también conocimiento de dos presas con vertederos escalonados, ubicados en la actual Irak, que fueron construidas por los asirios 700 años A.C. para abastecer de agua a Nínive, antigua capital de Asiria, coincidente con la actual ciudad de Mosul.

En tiempos del Imperio Romano se construyeron presas con vertederos escalonados en Siria, Libia, Túnez (donde aún subsiste la presa de Kasserine), continuando también ese tipo de obras por parte de los musulmanes, que han dejado sus rastros en España y Asia Menor. Un ejemplo de esos vertederos escalonados puede observarse en la presa de Adheim, en el actual Irak.

La influencia de los moros en España fue relevante también en esta disciplina. En efecto, los ingenieros españoles fueron los primeros de Europa en construir presas con vertederos escalonados, contando con ejemplos como las presas de Almansa y Alicante (España), y otras obras llevadas a América en la época colonial, comenzando en el territorio mejicano.

También existen evidencias de que los grandes ingenieros precolombinos del imperio incaico ya utilizaban las gradas en vertederos y canales de fuerte pendiente.

Según la opinión de los expertos, estas presas antiguas justificaban los vertederos escalonados por razones de estabilidad estructural, atribuyendo a la presa de New Croton, construida en 1906 en los Estados Unidos de América, el carácter de pionera en la que se utiliza el sistema de escalones para contribuir decisivamente en la disipación de energía.

Si bien al comienzo del siglo XX se utilizó el sistema escalonado para la disipación parcial de energía en la caída de un aliviadero, este criterio de diseño fue perdiendo interés para los proyectistas. Con la utilización del hormigón compactado a rodillo (HCR) y la utilización de gaviones en obras hidráulicas de mayor porte, ya avanzada la década del setenta, vuelve a producirse un notable desarrollo de esta técnica.

La sucesiva construcción de presas de HCR, con la ventaja relativa de este sistema para implementar los vertederos escalonados, ha incentivado a diversos equipos de ingenieros e investigadores a estudiar este tipo de vertederos, intentando definir lineamientos de proyecto que sirvan para el dimensionamiento de los mismos. En un trabajo previo (Lopardo y Bacchiega, 2002) se presentó un panorama acerca del “estado del arte” del diseño y construcción de vertederos escalonados, indicándose que quedaban aún abiertos como temas de investigación y desarrollo dos aspectos fundamentales: a) la pérdida efectiva de energía a lo largo del vertedero y su influencia en la disminución de la longitud de cuenco amortiguador y b) el problema del caudal específico máximo, limitado por la mayor parte de los autores a menos de $25 \text{ m}^3/\text{s.m.}$, en virtud de que con las técnicas clásicas de predicción para valores más elevados podrían presentarse daños por cavitación.

Si bien se ha seguido trabajando en el estudio de vertederos escalonados, los criterios de diseño presentan aún limitaciones. La bibliografía cita algunos ejemplos de presas cuyos vertederos en gradas erogaron crecidas con caudales específicos varias veces superiores al límite supuesto, sin sufrir daños por cavitación. De todas formas, no se han establecido elementos de análisis que permitan establecer cual es la eficiencia que han tenido dichos aliviaderos desde el punto de vista de la pérdida de energía.

En el contexto planteado, el objetivo de este artículo es presentar una actualización del estado del arte en el estudio de vertederos escalonados, efectuar una aplicación de diseño de una rápida escalonada y cuenco disipador a resalto para el caso de la presa El Bolsón, y plantear un

lineamiento metodológico para la evaluación sobre un modelo físico adecuado de distintos aspectos, aún no totalmente clarificados.

DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN UNA RÁPIDA ESCALONADA

Determinación del factor de fricción

La principal función del vertedero escalonado es provocar una pérdida de energía en el recorrido del talud aguas abajo, de manera que la energía remanente en la descarga disminuya a valores tales que aseguren un adecuado comportamiento del lecho contra la erosión local, bajando sensiblemente los costos siempre elevados de los cuencos amortiguadores.

A los efectos de efectuar un análisis de interés tecnológico se considerará que el escurrimiento es uniforme a lo largo del perfil vertedor, con aireación plena en toda la vertical.

Si se considera que el factor de resistencia “f” de Darcy-Weisbach es un parámetro adimensional adecuado para el análisis de las pérdidas de energía en régimen uniforme, su determinación en vertederos escalonados puede resultar relevante. A partir de la ecuación de cantidad de movimiento (Rajaratnam, 1990) es posible expresar ese coeficiente mediante la expresión (1):

$$f = \frac{8 \cdot h_u^3 \cdot g \cdot \sin\phi}{q^2} \quad (1)$$

donde h_u es el tirante del flujo uniforme, g es la aceleración de la gravedad, ϕ es el ángulo del talud del vertedero y q es el gasto específico del mismo.

Esa fórmula permite a su vez la presentación de una “ecuación universal de pérdidas de carga” (Chanson, 1993) utilizando el diámetro hidráulico D_h , de acuerdo a (2):

$$f = \frac{8 \cdot h_u^2 \cdot g \cdot \sin\phi \cdot (D_h/4)}{q^2} \quad (2)$$

Analizando resultados de diferentes autores, el mismo autor (Chanson, 1994) estima que el factor de resistencia es independiente del número de Reynolds del escurrimiento, siendo sólo función de la rugosidad relativa D_h/k (k es la rugosidad producida por los escalones), considerando que para un ángulo de talud $\alpha = 12^\circ$ puede expresarse mediante la ecuación (3):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.42 \cdot \ln\left(\frac{D_h}{k}\right) - 1.25 \quad (3)$$

Experiencias desarrolladas por otros investigadores (Tozzi, 1992) demuestran que el factor de fricción no varía sensiblemente con α estimando un valor constante $f = 0,163$ para una relación entre tirante del escurrimiento y altura de rugosidad $h/k \leq 1.8$ y talud 1V:0.75H.

Otros autores (Chamani y Rajaratnam, 1999a) proponen una expresión empírica (4) a partir de datos experimentales propios en vertederos escalonados, con valores de pendiente entre $51^\circ < \alpha < 59^\circ$:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 7.70 \cdot \log\left(\frac{h}{k}\right) - 7.06 \quad (4)$$

Estudios desarrollados en Suiza (Boes y Hager, 2003) han permitido ajustar una expresión empírica del coeficiente de fricción, con ángulos del talud aguas abajo entre 19° y 55°, en la que también se han sumado datos experimentales de otros investigadores. Dicha expresión queda dada por la relación (5):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{1}{\sqrt{0.5 - 0.42 \cdot \sin(2 \cdot \phi)}} \cdot \left[1 - 0.25 \cdot \log\left(\frac{K}{D_{h,w}}\right) \right] \quad (5)$$

, siendo $K/D_{h,w}$ es la rugosidad relativa.

A pesar del esfuerzo de los autores mencionados, si todos los datos experimentales de los diversos autores se incluyen en un mismo gráfico (Chanson et al., 2002) se observa una dispersión exagerada, que para una dada condición de escurrimiento puede variar entre $0,1 < f < 4$. Por ello, en esa misma referencia se presenta la ecuación (6), extraída del análisis dimensional:

$$\phi \left[V/\sqrt{g \cdot h}, V \cdot h/\nu, g \cdot \nu \cdot (\mu/\sigma)^3, C, h/H, B/h, \phi, k/h \right] = 0 \quad (6)$$

siendo $V/\sqrt{g \cdot h} = \mathbf{F}$ el número de Froude del escurrimiento conformado por la velocidad media V y el tirante h , $V \cdot h/\nu = \mathbf{R}$ el número de Reynolds del flujo utilizando el tirante como longitud representativa, $g \cdot \nu \cdot (\mu/\sigma)^3 = \mathbf{M}$ el número de Morton, que entrelaza las propiedades físicas del escurrimiento (coeficiente de difusividad de cantidad de movimiento ν , viscosidad dinámica μ y coeficiente de energía superficial σ), “C” es la concentración media de aire del escurrimiento, H la altura del vertedero, y B el ancho del mismo.

Un rápido examen de la función anterior permite apreciar que la utilización de la velocidad V como variable del escurrimiento, si bien parece útil para que aparezcan los números de Froude y Reynolds hace necesario incluir un parámetro físicamente inconveniente, como es la relación B/h , que no debiera tener relevancia. Si se utiliza como variable representativa del escurrimiento su gasto específico $q = Q/B$, dicho parámetro sería innecesario. Dado que para un escurrimiento deslizante en vertederos escalonados el factor de resistencia es independiente del número de Reynolds, ese problema queda resuelto. En cuanto al número de Froude, por inclusión de la nueva variable quedaría reemplazado por una especie de “número de caída” (Lopardo y Sly), definido en la expresión (7):

$$Z^* = \frac{q^2}{\sqrt{g \cdot H^3}} \quad (7)$$

Siendo el fluido agua, para rangos de temperatura normales, el número de Morton no parece demasiado importante, de modo que la función anterior puede reducirse a la expresión (8):

$$\Psi \left[q^2/\sqrt{g \cdot H^3}, C, h/H, \phi, k/h \right] = 0 \quad (8)$$

Efectuando un análisis dimensional ortodoxo, debiera reemplazarse el número de Morton por el número de Weber, definido según la ecuación (9):

$$W = \frac{V \cdot \sqrt{h}}{\sqrt{\sigma/\rho}} \quad (9)$$

, pudiendo mostrarse que la relación $M = F^2 R^4 / W^3$.

Finalmente, el factor de resistencia en vertederos escalonados “f” fue estimado recientemente (Sanagiotto, 2003) en relación con su similar de vertedero liso f_L (10), tomando en cuenta la relación entre la longitud L del tamo considerado desde la cresta en relación con la posición de inicio de aireación del flujo L_A , denominando $L^* = L/L_A$:

$$\frac{f}{f_L} = 1.816 \cdot e^{-1.7 \cdot L^*} \quad (10)$$

La distancia L_A puede calcularse por medio de la expresión empírica (11):

$$L_A = 9.77 \cdot k \cdot F_*^{0.7} \quad (11)$$

, siendo $F_* = q / \sqrt{(g \cdot \sin \phi \cdot k^3)}$.

Evaluación de la disipación de energía

De acuerdo con Rajaratnam (1990) es posible estimar la pérdida de energía en un perfil escalonado mediante su relación con uno similar liso, a través de la diferencia entre las energías residuales E (escalonado) y E_L (liso), quedando expresada por medio de las ecuaciones (12) y (13):

$$\Delta E = E_L - E \quad (12)$$

$$\frac{\Delta E}{E_L} = \frac{\left[(1 - \lambda) + F_L^2 \cdot \left(\frac{\lambda^2 - 1}{2 \cdot \lambda^2} \right) \right]}{1 + \frac{F_L^2}{2}} \quad (13)$$

, donde λ es función de los factores de resistencia de los perfiles lisos y escalonados.

A partir de consideración de que el régimen deslizante sobre torbellinos alcanza las características de flujo uniforme (Chanson, 1993) se ha estimado la pérdida de energía total viene dada por la expresión (14):

$$\frac{\Delta E}{H_a} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \cdot \sin \phi} \right)^{1/3} \cdot \cos \phi + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{f}{8 \cdot \sin \phi} \right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_v}{h_c}} \quad (14)$$

, donde H_a es la energía total en una sección cualquiera de aguas arriba, H_v es la altura total del vertedero (diferencia entre cotas de cresta y cuenco amortiguador) y h_c es el tirante crítico del flujo.

Chamani y Rajaratnam (1994) proponen a su vez otra fórmula de cálculo (15):

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{1 - \varphi^n \cdot \left[1 + 1.5 \cdot \frac{h_c}{H} \right] + \Sigma^n (1 - \varphi)}{n + 1.5 \cdot \frac{h_c}{H}} \quad (15)$$

, donde n es el número de escalones, E_0 es la energía específica al pie del vertedero sin considerar las pérdidas de carga y φ la pérdida de carga media por escalón, dada por la expresión (16):

$$\varphi = \left(0.30 - 0.35 \cdot \frac{H}{L} \right) - \left(0.54 + 0.27 \cdot \frac{H}{L} \right) \cdot \log \left(\frac{h_c}{H} \right) \quad (16)$$

Por otra parte, Sanagiotto (2003) propone la expresión (17) de la pérdida de energía ΔE en relación con la energía disponible aguas arriba E_m :

$$\frac{\Delta E}{E_m} = \frac{E_m - E}{E_m} \quad (17)$$

E_m y E quedan definidos mediante las ecuaciones (18) y (19):

$$E_m = Y + 1.5 \cdot h_c \quad (18)$$

$$E = z + h \cdot \cos \phi + \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (19)$$

, donde E es la energía en cualquier punto a lo largo del vertedero escalonado, Y es la diferencia de cotas entre ese punto y la cresta del vertedero, h el tirante, V la velocidad media (suponiendo coeficiente de Coriolis unitario) y z la cota del piso en el punto considerado.

Los resultados muestran mayor eficiencia de vertederos escalonados con escurrimientos aireados en relación con los no aireados, así como para escalones de mayor tamaño respecto de los de menor altura, tal como surge de la apreciación de la Figura 1.

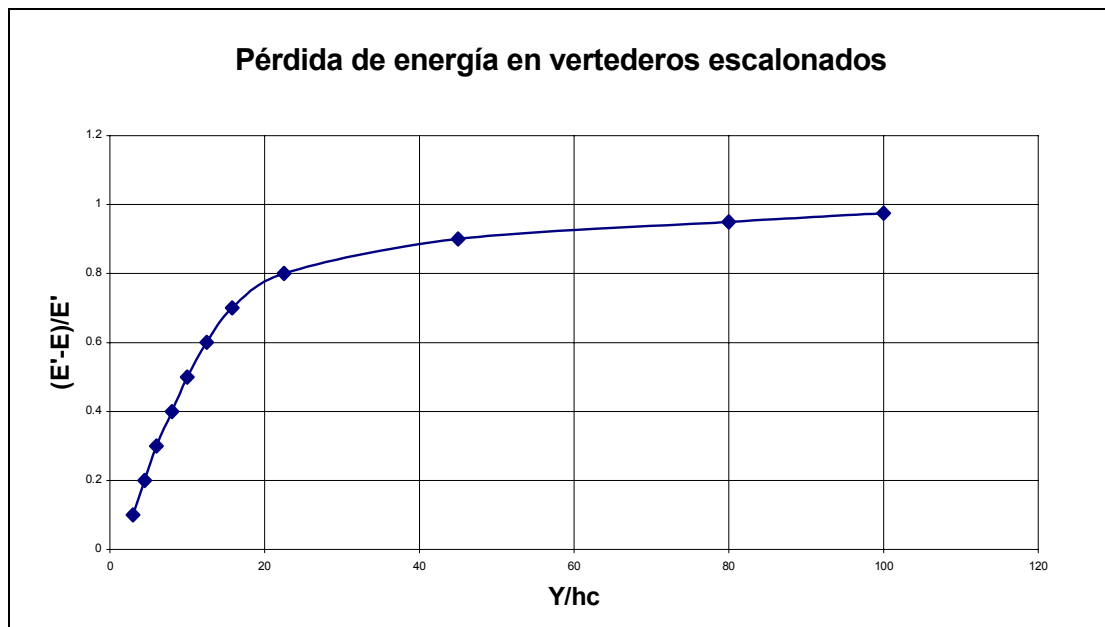


Figura 1-Pérdida de energía en vertederos escalonados

Boes y Hager (2003) establecen una diferencia en la forma de cálculo de la energía residual al pie de una rápida escalonada, de acuerdo a si el flujo es uniforme o no se han alcanzado dichas condiciones. Las condiciones de flujo uniforme o no uniforme quedan dadas por (20) y (21):

$$\frac{H_{presa}}{h_c} \geq 15 - 20, \text{ condiciones para que se alcance el flujo uniforme.} \quad (20)$$

$$\frac{H_{presa}}{h_c} < 15 - 20, \text{ condiciones para las que no se alcanza el flujo uniforme.} \quad (21)$$

Para un flujo no uniforme, la energía residual queda expresada por (22):

$$\frac{H_{res}}{H_{m\acute{a}x}} = \exp \left[\left(-0.045 \cdot \left(\frac{K}{D_{h,w}} \right)^{0.1} \cdot (\sin\phi)^{-0.8} \right) \cdot \frac{H_{presa}}{h_c} \right] \quad (22)$$

Para el caso de flujo uniforme, la ecuación resultante es la indicada en (23):

$$\frac{H_{res}}{H_{m\acute{a}x}} = \frac{F}{\frac{H_{presa}}{h_c} + F} \quad (23)$$

, donde F es:

$$F = \left(\frac{f}{8 \cdot \sin\phi} \right)^{1/3} \cdot \cos\phi + \frac{\alpha}{2} \cdot \left(\frac{f}{8 \cdot \sin\phi} \right)^{-2/3} \quad (24)$$

EVALUACIÓN DE LA TENDENCIA A CAVITACIÓN

Tal como se ha indicado, la mayor parte de las investigaciones realizadas hasta el presente limitan el uso de vertederos escalonados a caudales inferiores a 25 m³/s.m en virtud de los potenciales riesgos de cavitación en la estructura de alivio.

Si bien uno de los aspectos ventajosos de la construcción de este tipo de estructuras radica en la reducción de velocidades de escurrimiento y en una importante incorporación de aire en la masa fluida (con la consecuente reducción de los riesgos de cavitación), podrían establecerse condiciones propicias para la aparición de presiones negativas en las caras de los escalones.

Los ensayos realizados hasta el presente han demostrado que las posibilidades de que se registren presiones no admisibles respecto de las condiciones de inicio de cavitación resultan bajas para caudales unitarios inferiores a los 20 m³/s.m.

Establecido el régimen de escurrimiento sobre el vertedero, las condiciones de cavitación se encontrarán asociadas, tanto para caudales como el anteriormente indicado o superiores, a los efectos de depresión y fluctuaciones de presión originados en el entorno de las caras de los escalones. En este contexto, la determinación de los riesgos reales de erosión por cavitación para caudales superiores al señalado requiere de la ejecución de ensayos sistemáticos en modelos físicos en escala adecuada, el relevamiento de presiones fluctuantes sobre los escalones y la correspondiente corroboración de las estructuras construidas actualmente para caudales de diseño superiores al límite señalado.

La aplicación de las teorías clásicas de análisis de riesgos de cavitación, con la determinación de parámetros de cavitación del escurrimiento y parámetros críticos de inicio de la cavitación, conduce inexorablemente a la limitación del caudal de diseño, no encontrándose en la bibliografía elementos que permitan garantizar, en la etapa de diseño, la no existencia de riesgos de cavitación para caudales unitarios mayores.

Ensayos de laboratorio (Matos, 1999) han demostrado la existencia de aire emulsionado aguas abajo de la sección de escurrimiento en la cual se produce el afloramiento de la capa límite, encontrándose en zonas próximas a la misma concentraciones de aire cercanas al 8%. Por esta razón, la determinación de los riesgos de cavitación se efectúa para la sección más crítica en la cual se produce el afloramiento de la capa límite.

La determinación de la ubicación de dicha sección fue realizada por diversos autores a partir de la observación directa en ensayos sobre modelos físicos, estableciéndose expresiones empíricas (Matos, 1999) que permiten la definición de la distancia medida desde la cresta del aliviadero en la cual se produce el afloramiento de la capa límite así como la concentración media de aire existente en dicha sección. Las expresiones que permiten caracterizar esta zona del escurrimiento son las siguientes:

$$\frac{S_i}{k} = 6.289 \cdot F_*^{0.734} \quad (25)$$

$$\frac{h_i}{k} = 0.361 \cdot F_*^{0.606} \quad (26)$$

$$C_{mi} = 0.163 \cdot F_*^{0.154} \quad (27)$$

, donde S_i es la distancia medida desde la cresta del vertedero hasta la sección de afloramiento, h_i es una altura ficticia de agua ocupada por agua en el escurrimiento emulsionado aire-agua y C_{mi} es la concentración media de aire en agua en la sección considerada. Todos los parámetros dependen de un número de Froude que depende de la rugosidad de forma k (dependiente de la altura del escalón s) y del caudal específico, el cual fuera definido en (11).

La determinación de los riesgos de cavitación en una estructura de alivio requiere la definición del parámetro de cavitación del escurrimiento y su relación con el parámetro crítico para el cual se establecen las condiciones propicias para el inicio de la cavitación.

El parámetro de cavitación del escurrimiento relaciona las condiciones de presión del mismo con su correspondiente energía cinética (Quintela, 1980). Considerando la presión límite como la presión de vapor del agua, un tirante equivalente a la altura ficticia de agua definida por la expresión (26) y la velocidad media del escurrimiento, Matos define el índice de cavitación del escurrimiento como (27):

$$\sigma_i = \frac{0.094}{\text{tg } \phi} \cdot F_*^{-1} \cdot \left[1 + \frac{2.77 \cdot \left(\frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} \right)}{\cos \phi \cdot F_*^{0.606}} \right] \quad (27)$$

La condición de inicio de cavitación se produce para valores del índice de cavitación del escurrimiento inferiores a un determinado índice crítico ($\sigma_i < \sigma_{crit}$). Para el caso de rugosidades

distribuidas, el parámetro crítico de cavitación fue definido por Arndt (1979) en función del factor de resistencia del escurrimiento ($\sigma_{crit} = 4.f$).

Vinculando el factor de fricción con el coeficiente de forma k y el tirante ficticio de agua h, Matos, Quintela y Ramos, obtienen la expresión (28) para la determinación del parámetro crítico de cavitación:

$$\sigma_{crit} = \frac{4}{(1.696 + 0.691 \cdot \log F_*)^2} \quad (28)$$

La aplicación de esta metodología de cálculo para vertederos escalonados construidos con escalones con alturas variables entre 0.30 m y 1.20 m, conduce a la conclusión antes mencionada respecto al límite en el cual se equilibran los índices de cavitación del escurrimiento y el crítico de inicio de cavitación para un entorno de caudales específicos de 25 m³/s.m

De hecho, la mayor parte de los vertederos escalonados diseñados y construidos hasta el presente, no superan el valor límite antes mencionado, con excepción de aprovechamientos construidos en China.

En la Figura 2 se muestran las condiciones de diseño de un conjunto de obras construidas en diversos países y con distintas geometrías de escalones. En la misma se ha graficado el punto de diseño en cuanto a la relación del caudal específico de diseño, la altura del escalón y las condiciones para las cuales se producen riesgos de cavitación:

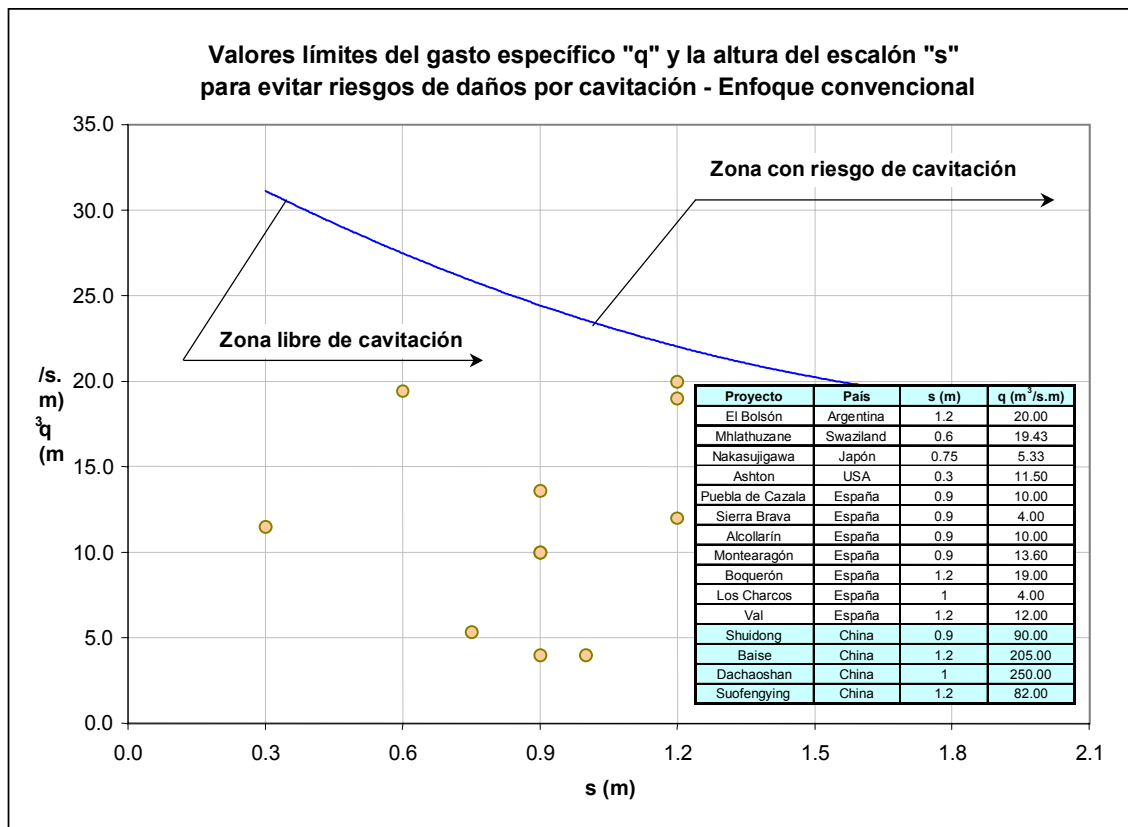


Figura 2 – Condiciones de diseño y evaluación del riesgo de cavitación

Tal como se observa, todos los aprovechamientos tomados como referencia presentan caudales unitarios de diseño inferiores a $20 \text{ m}^3/\text{s.m}$, condición que los ubica, según la teoría de cálculo descripta, en zonas libres de cavitación.

Es interesante remarcar los casos de los cuatro casos presentados conformados por aprovechamientos construidos en China cuyos caudales específicos superan ampliamente a los medios generales, con valores entre $82 \text{ m}^3/\text{s.m}$ y $250 \text{ m}^3/\text{s.m}$. Entre éstos, Un caso particular lo constituye el aprovechamiento de Shuidong, con un caudal de diseño de $6010 \text{ m}^3/\text{s}$ y 0.90 m de altura de escalón, el cual ha funcionado con un caudal máximo durante una crecida de $5400 \text{ m}^3/\text{s}$ y sin la aparición evidente de daños por cavitación.

Aplicando la teoría clásica de evaluación de riesgos de cavitación, se obtiene para las condiciones de diseño de este vertedero chino valores de índice cavitación del escurrimiento y de índice de cavitación crítico que resultan 0.30 y 0.48 respectivamente, tal como se aprecia en la Figura 3.

De acuerdo a lo observado, cualquiera fuere la altura de los escalones, según lo establecido por la teoría clásica de análisis, la estructura presentaría riesgos de cavitación con índices característicos del escurrimiento sensiblemente inferiores a los correspondientes valores críticos.

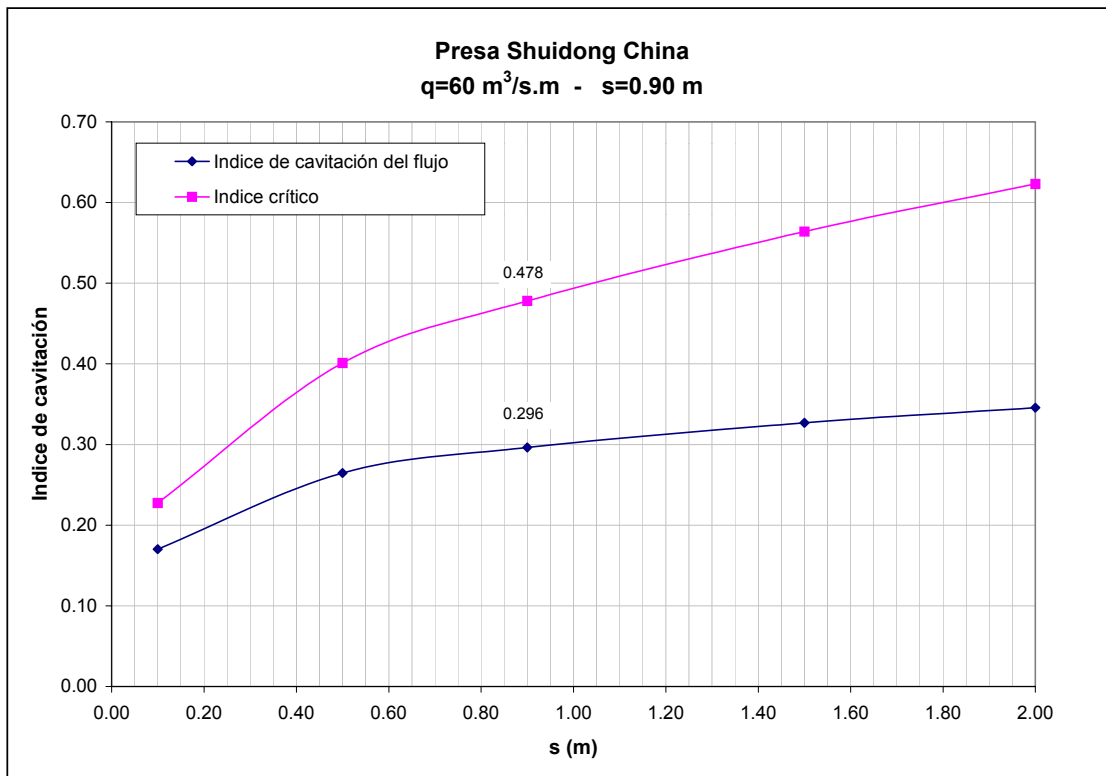


Figura 3 – Aplicación al caso de la presa Shuidong

En virtud de lo expuesto, el análisis de riesgos de cavitación continúa presentando incertidumbres a los fines de establecer, en etapa de proyecto, estructuras en las que pueda garantizarse condiciones admisibles de seguridad cuando los valores de diseño superan los límites de 20 a $30 \text{ m}^2/\text{s}$. No obstante, la metodología expuesta permite obtener una buena aproximación para el rango de caudales habituales en los cuales se encuentran diseñada la mayor parte de las obras actualmente construidas.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA LA PRESA EL BOLSÓN

La metodología general de cálculo expuesta permite el dimensionamiento y verificación de estructuras de alivio conformadas por vertederos escalonados, permitiendo la definición de la altura de los escalones, su vinculación con las condiciones de rugosidad de la estructura, la energía residual al pie de la obra y el dimensionamiento de la estructura de disipación complementaria.

En este contexto, resulta interesante exponer los resultados obtenidos en el diseño de un caso particular, actualmente en proyecto y en vías de construcción durante los próximos años, resultando la misma el primer caso de aplicación concreta de un vertedero escalonado en el país. A continuación se comentan las principales características que definen a la obra y los resultados obtenidos de la aplicación de la teoría de diseño y verificación.

Descripción de la obra

La presa El Bolsón conforma un aprovechamiento hidráulico que se encuentra actualmente en etapa de proyecto, previéndose el inicio de las obras para comienzos de 2006. La presa se ubicará sobre el río Albigasta, en la provincia de Catamarca, siendo la finalidad de la obra la creación de un embalse para el abastecimiento de agua para riego y consumo humano, y servir, además, para la atenuación de crecidas.

El proyecto prevé que la presa principal se construya siguiendo la metodología del hormigón compactado a rodillo (HCR). Esta tecnología ha sido fuertemente difundida a nivel mundial en las últimas décadas, contándose como único caso en el país con la presa Urugua-í.

La presa de HCR tendrá una altura del orden de 60 m, con un paramento aguas abajo de talud 1V:0.8H. El mayor aprovechamiento del embalse impone la construcción de una serie de cierres laterales cuya longitud total alcanza unos 550 m, previéndose que los mismos se materialicen también en HCR.

En relación con las estructuras de alivio, las mismas están conformadas por dos vertederos, uno principal emplazado en el cuerpo de la presa, sobre el curso del río y uno complementario sobre el cierre lateral de margen derecha (Figura 4). La condición de diseño de ambas estructuras de alivio se encuentra definida por un caudal máximo de $3400 \text{ m}^3/\text{s}$ que corresponden a un evento de crecida de 1000 años de recurrencia.

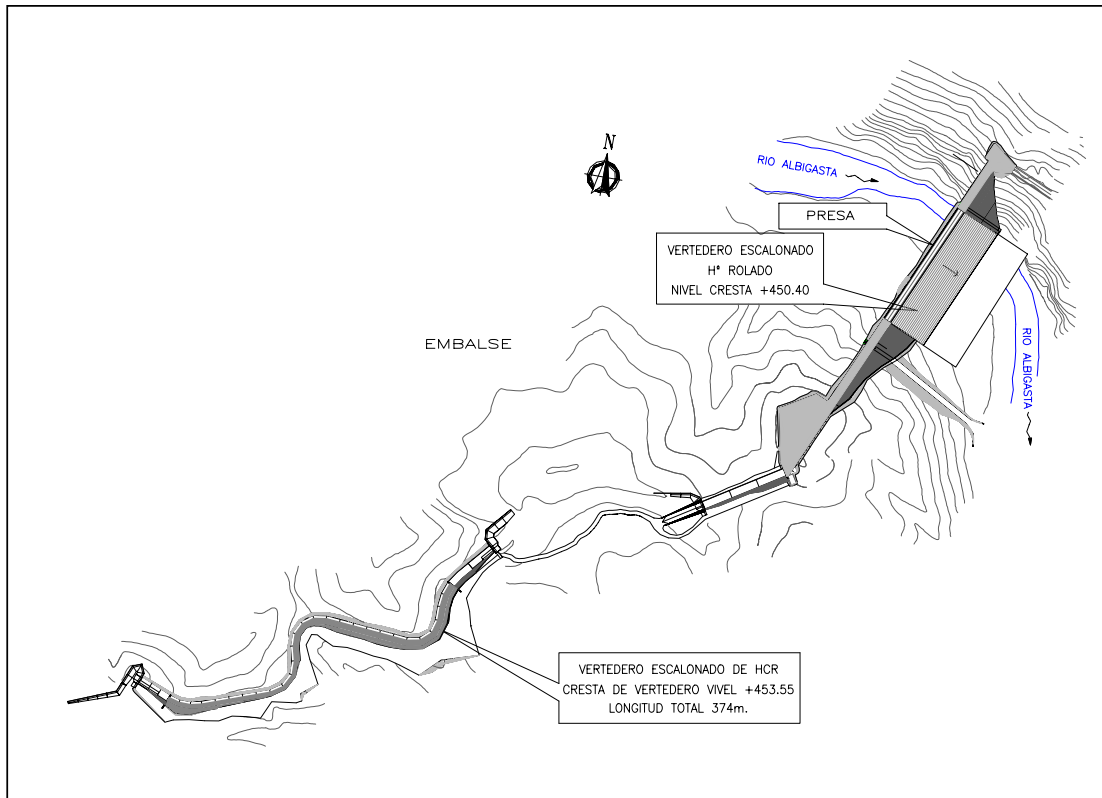


Figura 4 – Planta general del aprovechamiento El Bolsón

Ambas estructuras de alivio fueron diseñadas como vertederos escalonados, presentan el órgano principal un ancho total de 134.50 m, lo cual le permite evacuar, para la condición de diseño del sistema un total de 2500 m³/s sobre el máximo establecido para la crecida milenaria.

Tal como se dijo, el vertedero complementario se emplazará sobre el una parte del cierre lateral, en la margen derecha de la presa, con una longitud total de 374 m. La cota de cresta de este vertedero se ubica por encima de la del vertedero principal, de modo que su capacidad de evacuación máxima, en la condición de diseño, alcanza los 900 m³/s.

Condiciones de borde

Con la finalidad de dimensionar los órganos de evacuación, particularmente el vertedero, se efectuó un estudio hidrológico que permitió determinar que para una recurrencia de 1000 años (condición de diseño) el caudal pico alcanza los 3400 m³/s, mientras este último asciende a 4700 m³/s para la crecida decamilenaria.

Entre las condiciones de borde planteadas para el diseño de la obra, además de los aspectos hidrológicos, topográficos y geológicos del sitio de emplazamiento, y aquellas vinculadas con la optimización en el uso del recurso hídrico, se han planteado dos condiciones de borde directamente relacionadas con el diseño de un vertedero escalonado:

- a) Caudal específico máximo, q: 20 m³/s.m.
- b) Altura de escalón, s: 1.20 m.

La fijación de estas condiciones básicas de diseño no resultan arbitrarias. Tal como se ha señalado en puntos anteriores, su adopción obedece a la consideración de los estudios de investigación realizados en distintas instituciones del mundo así como en la experiencia de los vertederos construidos, los que han permitido plantear metodologías de cálculo para este tipo de variantes. En este sentido, los límites indicados permiten garantizar una relativamente alta disipación de energía sin que existan riesgos de inicio de cavitación, tal como será analizado en los siguientes puntos.

Diseño de la rápida y la estructura de disipación de energía

En el diseño de los aliviaderos, además del perfil vertedero propiamente dicho, deben evaluarse las características de la rápida y las distintas alternativas de disipación de energía que permitan restituir el flujo al cauce con la menor energía posible. Atendiendo inicialmente el diseño de la rápida, se ha considerado como alternativa de contraste, la implementación de una variante correspondiente a una rápida lisa (solución convencional) y su comparación con una rápida escalonada. La energía residual en el extremo aguas abajo será superior en el caso de disponer una rápida lisa, lo que puede condicionar la selección del tipo de estructuras de disipación de energía.

En efecto, tal como fuera desarrollado en los puntos anteriores, una rápida escalonada contribuye efectivamente a la disipación de energía, siendo esta última una función de la altura del escalón, de la inclinación del paramento aguas abajo, del caudal unitario, de la relación entre la altura de la presa y el tirante crítico, entre algunas de las variables más significativas.

En el caso de una rápida convencional, podrían plantearse dos soluciones conceptualmente diferentes. Por un lado, materializar un cuenco disipador clásico, mientras que por otra parte cabría la posibilidad de construir un salto de esquí, dependiendo, ambas soluciones, de las condiciones geométricas y geológicas del lecho aguas abajo y de la magnitud de la obra necesaria.

Si la rápida escalonada resultara conveniente, la opción del salto de esquí carecería de sentido, ya que la energía disipada en la rápida le quita capacidad de lanzamiento a la lámina líquida. En cambio, la disipación de energía por medio de un cuenco disipador a resalto resulta más que propicia, ya que debido a la menor energía residual incidente, la solución planteada dará lugar a un cuenco menos profundo y más corto en comparación con el resultante aguas abajo de una rápida convencional. La aplicación de este planteo a la presa El Bolsón permite comparar la energía residual para las variantes dadas por una rápida lisa y una rápida escalonada, donde se analizaron alturas de escalón $s=0.60$ m y $s=1.20$ m. La Figura 5 muestra que la disipación de energía es muy sensible con la variación del caudal específico, variando también con la altura de los escalones.

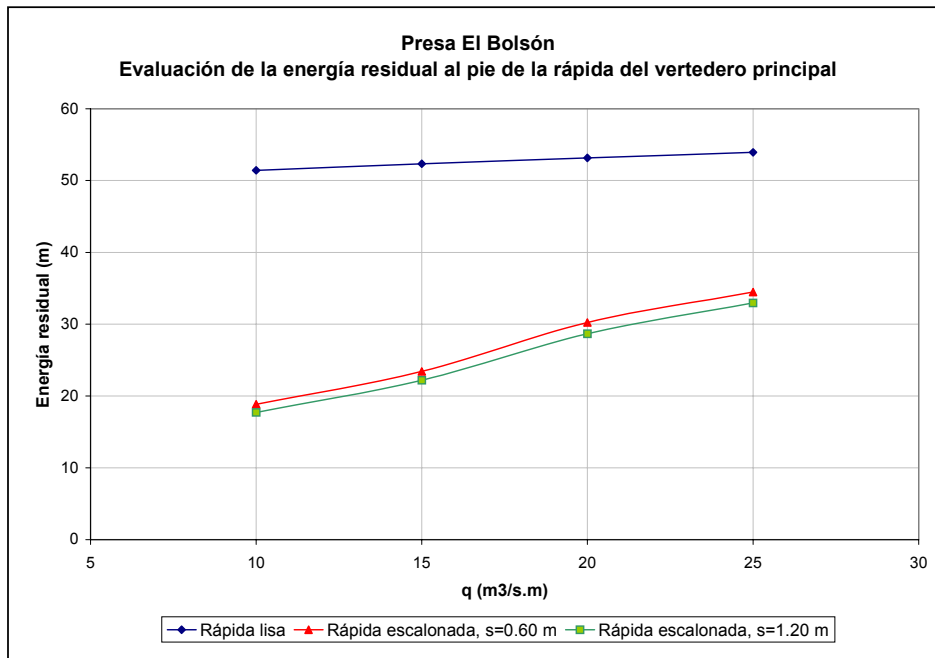


Figura 5 – Evaluación de la energía residual

Más allá de las ventajas del vertedero escalonado frente a una rápida convencional, es importante cuantificar las dimensiones del cuenco disipador a resalto que resulta necesario construir en ambos casos, de modo que pueda establecerse una comparación real entre ambas alternativas. El análisis efectuado para ambos casos da lugar a los cuencos disipadores a resalto cuyas dimensiones principales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Variante	Longitud del cuenco (m)	Cota de solera (m)
Rápida lisa	61.85	394.66
Rápida escalonada, s=1.20 m	47.30	397.00

Se aprecia que la longitud del cuenco resulta 23.5% más reducida para la variante de rápida escalonada de 1.20 m de altura, y que la cota de solera del mismo se emplaza 2.34 m por encima de la que correspondería al cuenco aguas abajo de una rápida lisa. En el caso de la presa El Bolsón, la diferencia de volúmenes de excavación entre ambas alternativas es del orden de 20000 m³.

Es importante señalar que, si bien los resultados no se presentan en este trabajo, las condiciones de diseño de la estructura han sido verificadas en un modelo físico a escala reducida construido en el Laboratorio de Hidráulica del INA.

Análisis del riesgo de cavitación

La evaluación de las condiciones de cavitación estuvo vinculada a la definición de una estructura libre de riesgos de erosión así como de una altura de escalón compatible con las necesidades de reducción de los costos involucrados en el proceso de disipación de energía. Considerando la metodología de evaluación expuesta, se analizaron las condiciones de cavitación de la estructura para dos alturas de escalón en función del caudal específico. En las Figuras 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos para $s=0.60$ m y $s=1.20$ m respectivamente:

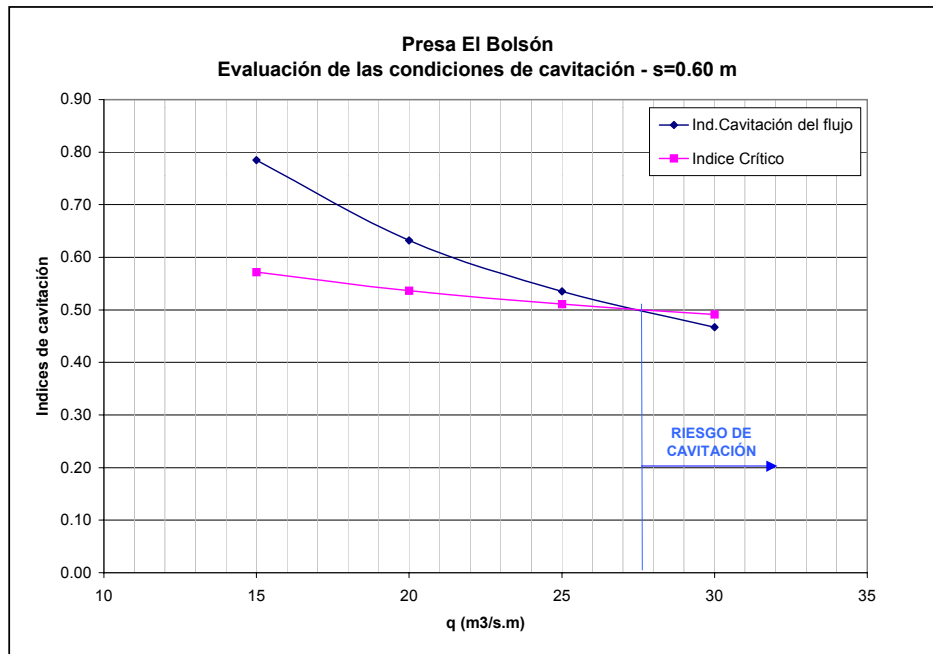


Figura 6 – Evaluación del riesgo de cavitación para $s=0.60$ m.

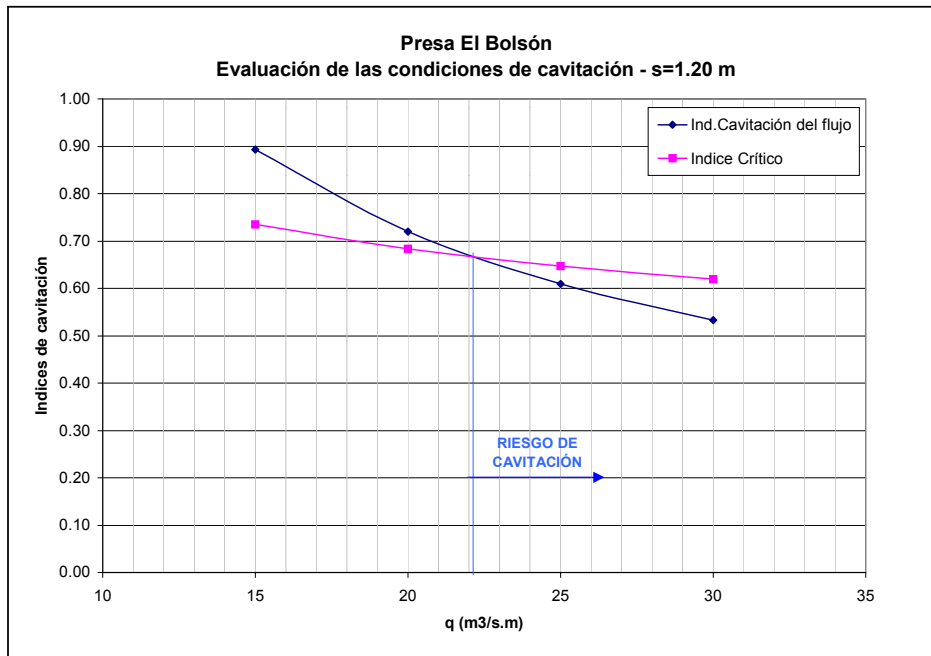


Figura 7 – Evaluación del riesgo de cavitación para $s=1.20$ m.

Tal como se observa, la adopción de una menor altura de escalón permitiría considerar, como condición de diseño, un caudal específico más elevado, cercano a los $28 \text{ m}^2/\text{s}$. No obstante, en este caso particular analizado, se dio prioridad a los efectos de disipación de energía que permitieron reducir la estructura de complementaria necesaria al pie de presa.

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL DESARROLLO DE NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo a lo expresado a lo largo del presente artículo, se han realizado avances muy significativos en la comprensión y cuantificación de los fenómenos físicos relacionados con el funcionamiento de vertederos escalonados. Sin embargo, subsisten algunos temas cuyo estudio se encuentra aún en etapa de desarrollo. Estos aspectos, sumado a la construcción de la primera presa de HCR con vertedero escalonado que se llevará a cabo en el país y la posibilidad cierta de que el uso de estas estructuras pueda hacerse extensivo a futuros proyectos, ha llevado al Laboratorio de Hidráulica del INA a desarrollar una propuesta metodológica para el estudio de vertederos escalonados.

En efecto, el INA ha iniciado recientemente la construcción de un dispositivo experimental, el cual representa una rápida escalonada con talud $1V:0.75H$, en la cual se podrán hacer circular caudales específicos de hasta $50 \text{ m}^2/\text{s}$. El objetivo básico de esta investigación es aportar elementos adicionales que permitan corroborar y sistematizar el funcionamiento de estructuras de alivio escalonadas con caudales específicos superiores a los límites establecidos por las teorías actuales.

En este contexto, se plantea el desarrollo de las siguientes líneas de investigación a fin de cumplimentar los objetivos antes planteados:

- Verificación de las pérdidas de energía sobre rápidas escalonadas, para distintas alturas de escalones, extendiendo el rango de gastos específicos por encima de $20 \text{ m}^3/\text{s.m}$. Este estudio contempla la construcción de un cuenco disipador, el cual permitirá, mediante la valoración de la energía residual en la sección final del resalto identificar, con mayor precisión, la eficiencia de la rápida escalonada.
- Relevamiento de presiones fluctuantes en distintos escalones, tanto en la zona aireada como en la zona no aireada. Esto permitirá evaluar la eventual tendencia a cavitación en la huella y en la contrahuella del escalón.
- Relevamiento de concentraciones de aire en contacto con los escalones. Estos valores, debido a las dimensiones del modelo, no estarán afectados por efectos de energía superficial, posibilitando una correlación directa con el establecimiento de un umbral de concentración que garantice condiciones de funcionamiento sin riesgos de inicio de cavitación.

La conclusión de los estudios señalados permitirá aportar elementos de juicio para lograr la sistematización de condiciones y pautas de diseño que permitan al proyectista abordar, con mayores seguridades, el diseño de vertederos escalonados con elevados gastos específicos.

CONCLUSIONES

Siguiendo una tendencia creciente en los últimos años, la implementación de vertederos escalonados se ha transformado en una alternativa ventajosa para el diseño de estructuras de alivio, principalmente en presas construidas en hormigón compactado a rodillo.

A partir de los lineamientos planteados en un trabajo anterior (Lopardo y Bacchiega, 2002), se ha actualizado el estado del arte respecto de la metodología de diseño de este tipo de estructuras, efectuándose consideraciones de interés respecto de la definición de las pérdidas de energía en la rápida y de los riesgos de cavitación en la estructura.

El criterio de diseño expuesto fue aplicado al caso particular de la presa El Bolsón que se construirá en la provincia de Catamarca, constituyéndose de esta forma en el primer vertedero escalonado que se materializará en el país.

Si bien se han logrado avances significativos en la comprensión y análisis de las condiciones de funcionamiento de este tipo de estructuras y, por ende, en la fijación de pautas de diseño, continúan resultando inciertas ciertos aspectos del funcionamiento vinculado con la operación de estructuras con caudales específicos superiores a los $25 \text{ m}^2/\text{s}$.

Se ha destacado en el presente trabajo los casos de presas construidas en China, las cuales se han diseñado y operado con caudales significativamente superiores al límite señalado. No obstante, no se han podido establecer aún parámetros de diseño que permitan corroborar el funcionamiento observado en esos aprovechamientos. Por esta razón, se ha propuesto el desarrollo de una línea de investigación que permita contribuir al entendimiento de las condiciones de funcionamiento y la definición de pautas de diseño de vertederos con caudales específicos elevados, principalmente en cuanto a la disipación de energía y a los riesgos de cavitación.

BIBLIOGRAFÍA

- Arndt, R.E., Holl, J.W., Bohn, J.C. y Bechtel, W.T.** (1999) "*Influence of surface irregularities on cavitation performance*". Journal of Ship Research, Vol. 23, N° 3, pp.157-169.
- Boes, R.M. y Hager, W.H.** (2003) "*Hydraulic design of stepped spillways*". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 129, N° 9, pp.671-679.
- Chamani, M.R. y Rajaratnam, N.** (1999a) "*Onset of skimming flow on stepped spillways*". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, N° 9, pp.969-971.
- Chamani, M.R. y Rajaratnam, N.** (1999b) "*Characteristics of skimming flow over stepped spillways*". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, N° 4, pp.361-368.
- Chanson, H.** (1993) "*Stepped spillway flows and air entrainment*". Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 20, N° 3, pp.422-435.
- Chanson, H.** (1994) "*Hydraulics of skimming flows over stepped spillways*". Journal of Hydraulic Research Vol. 32, N° 3, pp.445-460.
- Chanson, H., Yasuda, Y. y Ohtsu, I.** (2002) "*Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modelling*". Canadian Journal of Civil Engineering, v, 29, p. 809-819.
- Lopardo, M. C. y Bacchiega, J.D.** (2002) "*Un panorama acerca del estado del arte en el diseño de vertederos escalonados*". XIX Congreso Nacional del Agua. Villa Carlos Paz (Córdoba), Argentina.
- Matos, J., Quintela, A. y Ramos, C.** (1999) "*Sobre a proteccao contra erosao de cavitacao em descarregadores de cheias em degraus*".
- Quintela, A., Ramos, C.M.,** "*Proteccao contra heroazo de cavitacao em obrsa hidráulicas*", Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Memoria N° 539, Lisboa 1980.
- Rajaratnam, N.** (1990) "*Skimming flow in stepped spillways*". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 116, N° 4, pp.587-591.
- Sanagiotto, Daniela.** (2003) "*Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade $IV:0,75H$* ". Dissertacao de Mestrado. Universidad Federal Do Río Grande Do Sul, Porto Alegre.
- Tozzi, M.J.** (1992) "*Caracterizacao/ comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus*". Ph.D thesis. Univ. of Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil.