

Vertederos escalonados, abordaje teórico, experimental y numérico

Latessa, P. G. y Sabarots Gerbec, M.

Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires

E-mail: gastonlatessa@gmail.com

RESUMEN: Las presas de hormigón compactado a rodillo resultan actualmente una alternativa constructiva competitiva para las presas de hormigón de gravedad, dada la reducción de costos constructivos, aceleración de los procesos de obra y baja generación de calor por fraguado.

Este tipo de presas permiten la colocación de la estructura de aliviadero sobre la misma, aprovechando la geometría escalonada, típica en paramentos aguas abajo de las presas HCR, para incrementar la disipación de energía cinética a lo largo de la rápida.

Se presenta un análisis de la evolución experimental y teórica del estudio hidráulico de vertederos escalonados y la aplicación a un caso de interés actual que tiene lugar en la Presa El Bolsón, Catamarca, Argentina.

Se aborda el problema primero desde datos y relaciones con base empírica, para luego comparar los resultados con lo observado en Laboratorio y también para validar la aplicación de un modelo numérico utilizando técnicas de CFD.

INTRODUCCIÓN

La construcción de presas de hormigón macizas, mediante la alternativa constructiva del hormigón compactado a rodillos, ha sufrido en las últimas décadas un crecimiento notable. Esto se debe principalmente a la reducción de tiempos de colocación del hormigón, reducción en las temperaturas de fraguado y las resistencias características asociadas, que resultan mayores a los hormigones convencionales.

Desde el punto de vista hidráulico, esto ha impulsado una modificación en el concepto de las estructuras de alivio, permitiendo la inclusión de rápidas escalonadas, apoyadas sobre los paramentos secos siguiendo la forma típica de este tipo de presas.

Esta geometría escalonada presenta una ventaja indiscutible: el aumento de la disipación de energía cinética a lo largo de la misma, con la consecuente reducción en los tamaños de las estructuras disipadores al pie de la rápida.

Se propone en este trabajo el estudio analítico de los flujos característicos presentes en vertederos escalonados y las pérdidas de energía a lo largo de la rápida, para luego ser utilizado en el proceso de validación de un modelo numérico bidimensional construido mediante la herramienta OpenFoam. Se aborda

el ejemplo del vertedero de la presa El Bolsón, actualmente en construcción, sobre el río Albigasta, en la Provincia de Catamarca, Argentina.

DESARROLLO

Concepto

Los canales escalonados fueron utilizados desde las antiguas civilizaciones como obras de disipación de manera de garantizar la estabilidad de las estructuras hidráulicas utilizadas para conducción o embalse de las aguas. Ejemplos de estas antiguas estructuras son las dos presas en territorio Asirio sobre el río Khosr (actualmente territorio de Irak) construidas alrededor de 694 A.C.

En la actualidad, la introducción de las presas de Hormigón Compactado a Rodillo (HCR) reavivó el diseño de rápidas escalonadas, de manera de aprovechar la geometría típica de los paramentos secos en estas presas y diseñar estructuras que aumenten la energía disipada y reduzcan los tamaños de los cuencos de disipación al pie de la rápida.

Tipos de flujo. disipación de energía y cavitación

Una característica de estos tipos de vertederos es que varían el régimen de escurrimiento de acuerdo, principalmente, a la geometría del mismo y a los rangos de caudales característicos a los que se encuentra sometido.

Existe un número importante de autores que han investigado los diferentes flujos en estructuras escalonadas (Chanson, Tozzi, Chinnarasri, entre otros) y cada uno presenta diferentes relaciones de origen empírico para definir los límites entre aquellos.

- Flujo en láminas

El flujo en láminas o nappe flow, se caracteriza por la presencia de sucesivos jets en caída libre. Esta situación puede presentarse para caudales específicos bajos, o bien para rápidas con pendientes bajas. La disipación de energía bajo estas condiciones se desarrolla por el impacto de los jets contra los sucesivos escalones y la posible formación de resaltos hidráulicos.

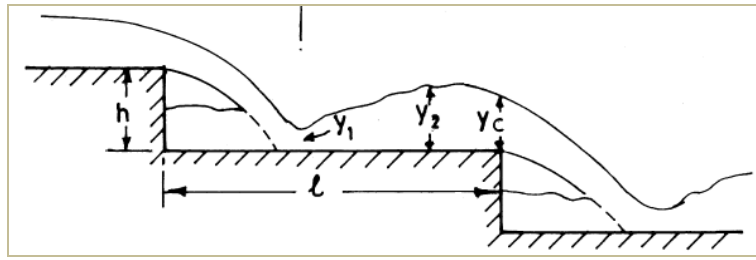


Figura 1 - Flujo en láminas con resalto hidráulico (Khatsuria, 2005)

- Flujo de transición

Al incrementarse el caudal la zona de aireación debajo de la lámina vertiente comienza a ahogarse. Este régimen presenta aireación significativa y aspecto caótico, con propiedades del flujo variable escalón tras escalón.

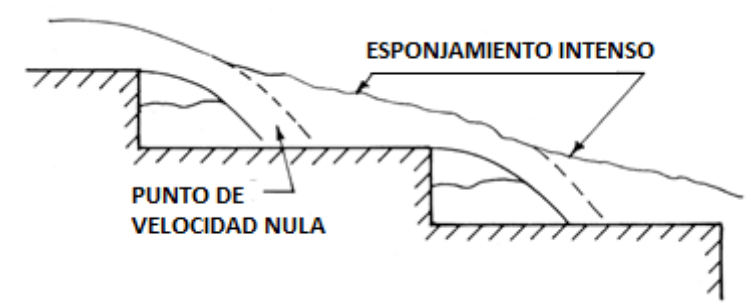


Figura 2 - Flujo de transición (Khatsuria, 2005)

- Flujo de superficie

En los flujos de superficie, el escurrimiento sobre las rápidas escalonadas presenta una región externa sobre los bordes de los escalones que actúan como falso fondo, y al área encerrada en cada escalón, con recirculaciones.

La capa límite desarrollada desde la cresta, aumenta hasta alcanzar la superficie libre. Este punto de contacto se conoce como Punto de Incepción, y marca el comienzo de un flujo gradualmente variado, donde la turbulencia produce una aireación natural de la superficie libre.

Hacia aguas abajo, el flujo se vuelve uniforme sin presentar cambios en el tirante, concentración de aire o distribución de velocidades.

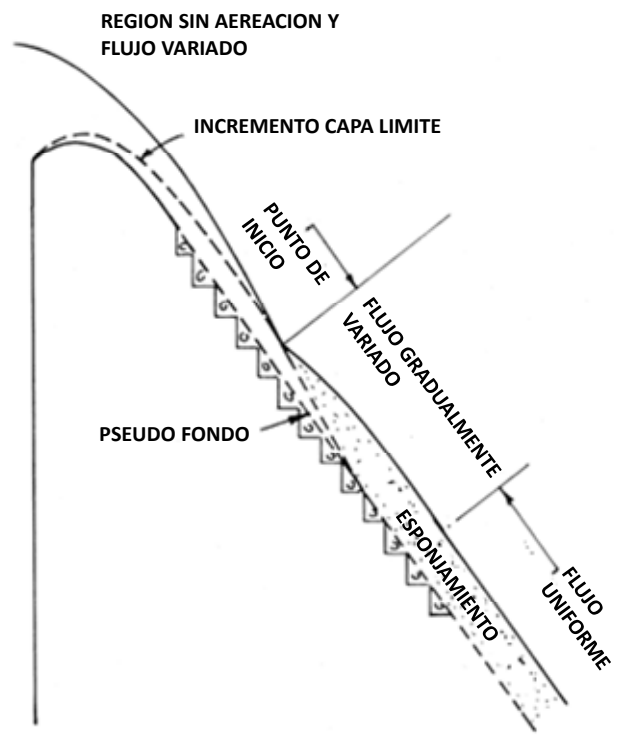


Figura 3 - Regiones de flujo a lo largo de la rápida en flujos de superficie (Khatsuria, 2005)

La transición entre los tipos de flujo puede resumirse en función de la relación altura/ancho de los escalones de la rápida y el caudal específico (o tirante crítico). Chanson (2001) vincula la característica geométrica de los escalones (h y l , alto y largo respectivamente) con las características del escurrimiento (d_c , tirante crítico). En la siguiente figura se grafican las relaciones que permiten diferenciar distintos tipos de escurrimiento en el vertedero escalonado, yendo desde el Flujo en Láminas para escalones largos y bajos caudales hasta el Flujo de Superficie con escalones altos y elevado caudal.

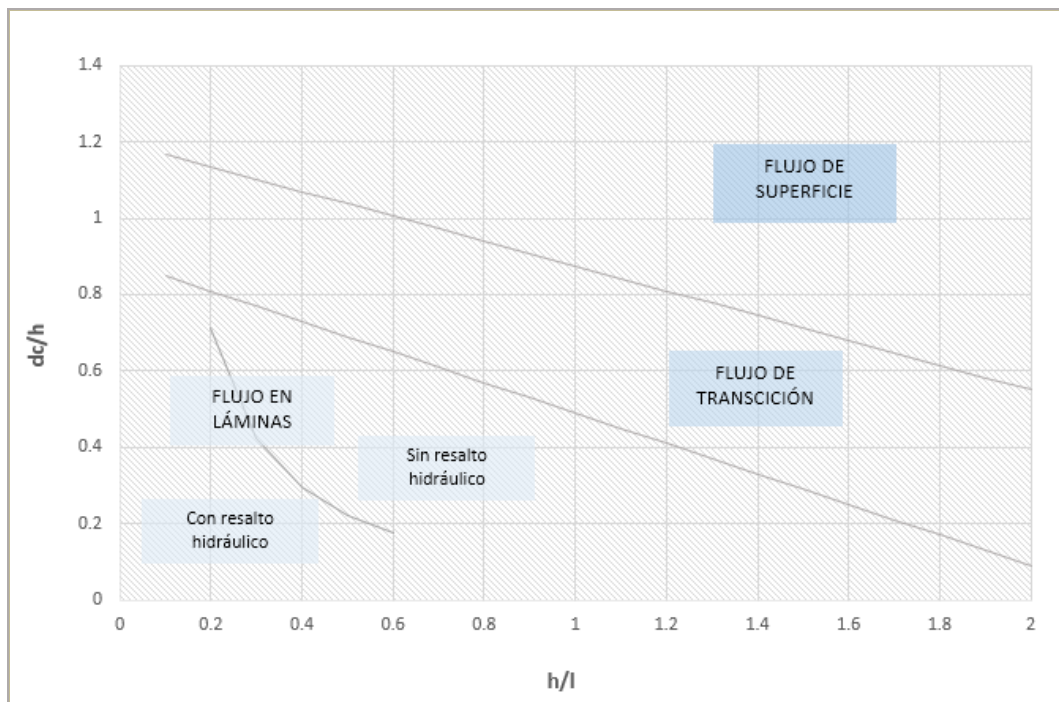


Figura 4 - División de flujos presentes en estructuras escalonadas (Chanson, 2001)

Disipación de energía

La disipación de energía es un tema de crucial importancia en estructuras de alivio debido a que es necesario controlar la energía cinética del flujo de manera controlada y garantizar la seguridad de la obra.

Las pérdidas en las rápidas lisas resultan sustancialmente menores a aquellas logradas en rápidas con escalones. En estos últimos, la relación de energía disipada con respecto a la energía total disponible depende del tipo de escurrimiento presente.

Se observa en la Figura 5 la energía remanente al pie de la rápida en función de la altura de presa para el caso de flujo en láminas, considerando distintas alturas de escalón.

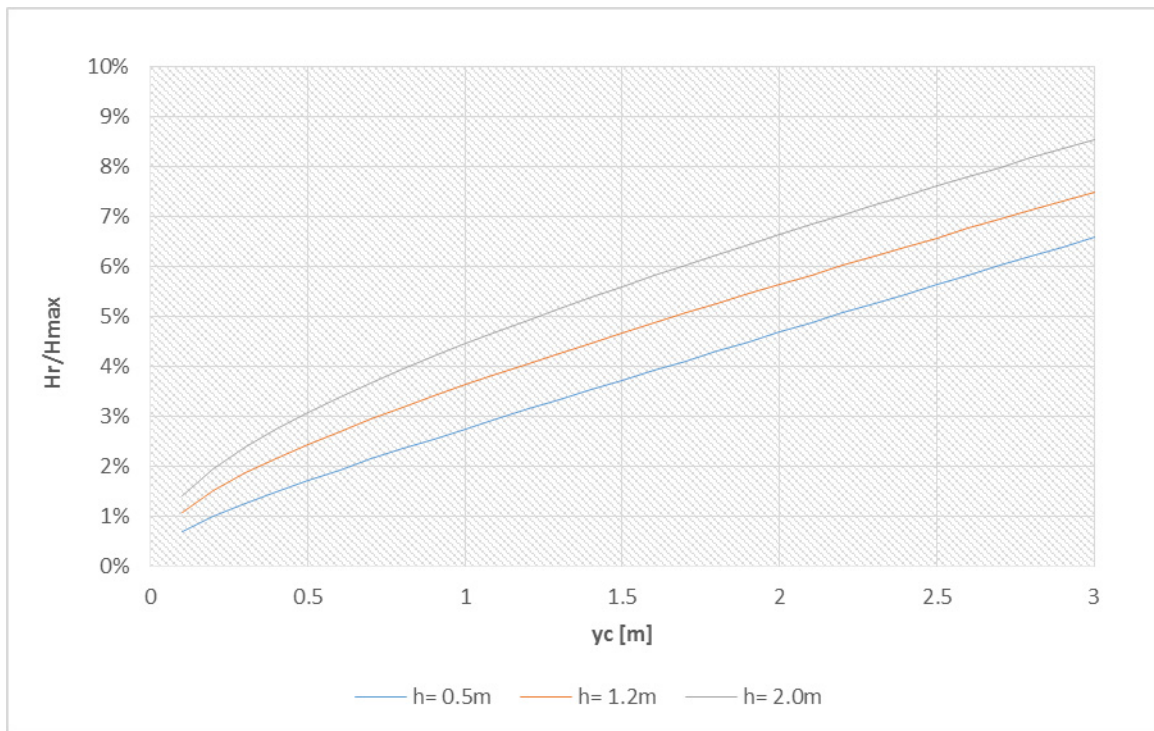


Figura 5 – Relación de Energía remanente al pie de rápida sobre Energía total – Flujo en láminas. (Chanson, 2001)

Para el caso de flujos superficiales, ante la alta turbulencia presente, la disipación de energía difiere según se trate de un flujo uniforme o rápidamente variado.

En un flujo totalmente desarrollado y uniforme, las pérdidas a lo largo de la rápida pueden estimarse a partir de un coeficiente de fricción f de Darcy-Weisbach, considerando la rugosidad introducida por los escalones.

Siguiendo esta línea, varios autores han obtenido relaciones analíticas para obtener este coeficiente de fricción. En la siguiente figura se presentan algunos de ellos.

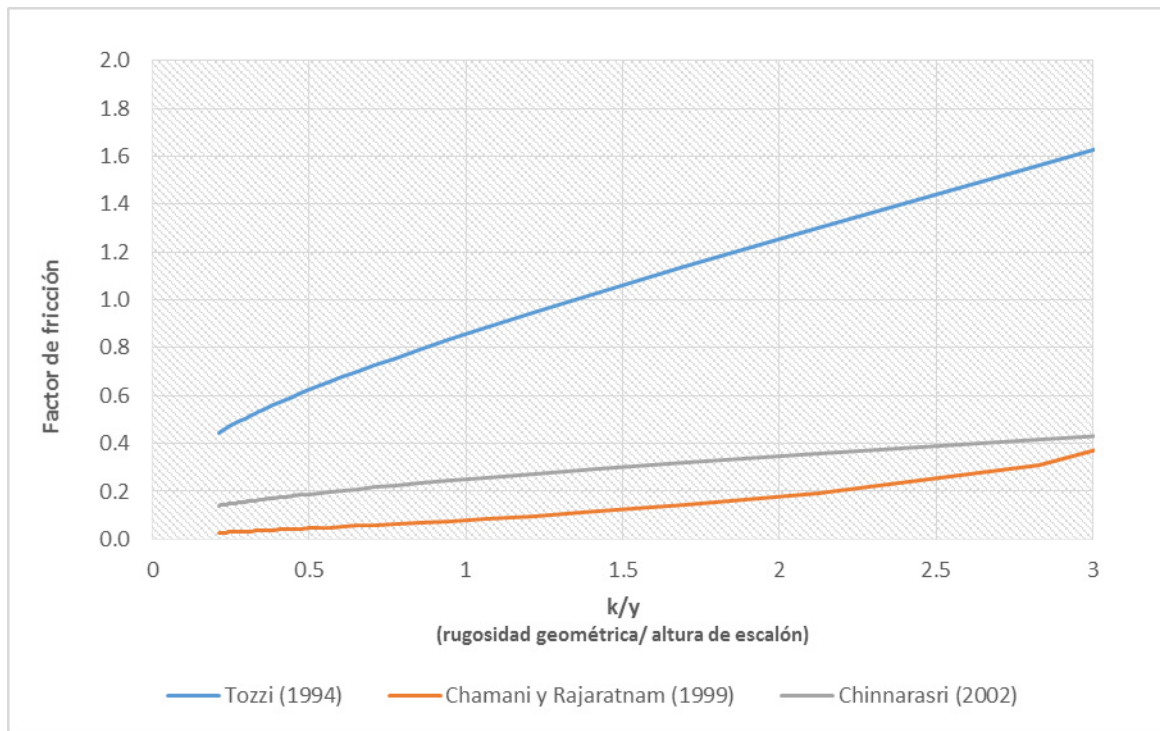


Figura 6 - Valores del coeficiente de fricción en función de la rugosidad y el tirante

Otros autores en cambio sugieren rangos para el coeficiente de fricción para experiencias con diferentes geometrías y caudales:

- Rajaratnam (1990): $f = 0.2 - 1.12$; *Promedio: 0.72*
- Chanson et al. (2001): $f = 0.42, 0.68, 1.2$
- Matos et al. (1995): $f = 0.24 - 4$; *Promedio: 0.72*

MODELACIÓN NUMÉRICA

Para realizar el ejercicio de modelación numérica, con el objetivo de comparar resultados obtenidos con las relaciones antes expuestas y observaciones en modelo físico, se tomó como caso de estudio el de la presa El Bolsón, actualmente en construcción, emplazada sobre el río Albigasta, en la Provincia de Catamarca.

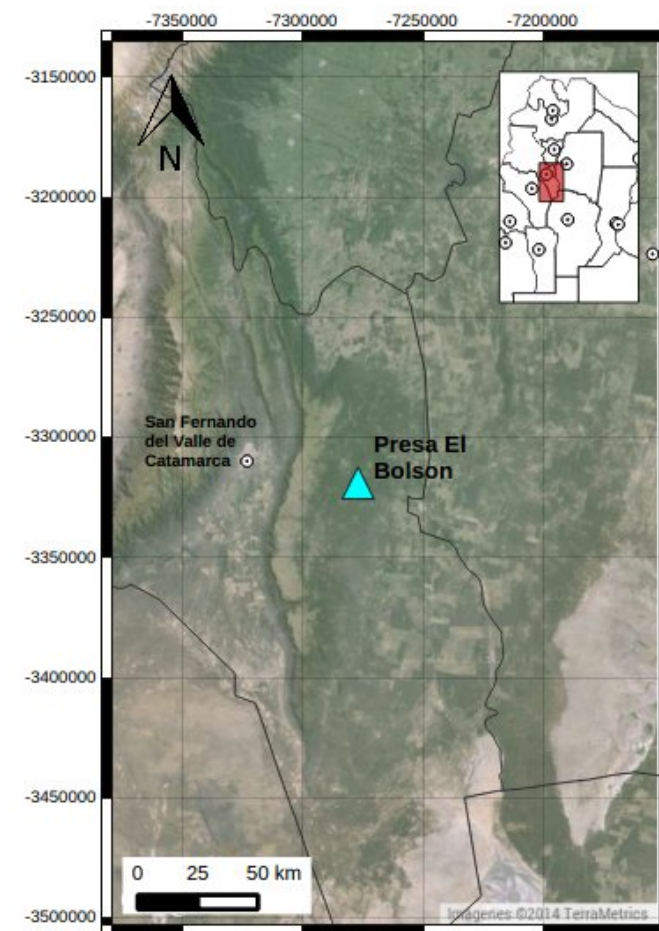


Figura 7 - Ubicación de la Presa El Bolsón, Catamarca, Argentina

Se trata de una presa de hormigón maciza de tipo (HCR) y presenta una estructura de aliviadero con rápida escalonada.

Según las especificaciones del pliego, los escalones serán de 1,20m tanto en altura como longitud, contando en su cresta la forma de un perfil tipo Creager, en el caso del vertedero principal, a cota +450,40msnm. Sobre el cierre lateral, también se emplazará un vertedero auxiliar también escalonado, presentando una cresta ancha.

Este estudio se centra en el análisis del vertedero principal, sin tener en cuenta el rango de niveles de embalse en los que entraría en funcionamiento el vertedero auxiliar, cuya cresta se encuentra a cota +453,55msnm, 3,15m sobre la cresta del vertedero principal.

Metodología

Para el presente trabajo, se construyó un modelo CFD (Computational Fluid Dynamics) bidimensional, mediante el software libre OpenFoam. Esta herramienta resuelve las ecuaciones de Navier Stokes mediante

el método numérico de Volúmenes Finitos, y se aplica en este caso para representar la superficie libre, la metodología VOF (Volume Of Fluid).

Cabe aclarar que el código utilizado para resolver la hidrodinámica de esta estructura, si bien analiza la interface agua-aire, no considera efectos de aireación o esponjamiento.

La discretización del dominio fue realizada mediante una malla estructurada, incluyendo parte del embalse de manera de descartar efectos inducidos por las condiciones de entrada aplicadas al modelo.

Los resultados fueron contrastados contra mediciones realizadas sobre modelo físico (Bacchiega y Fattor, 2006) y aproximaciones analíticas también desarrolladas con base empírica.

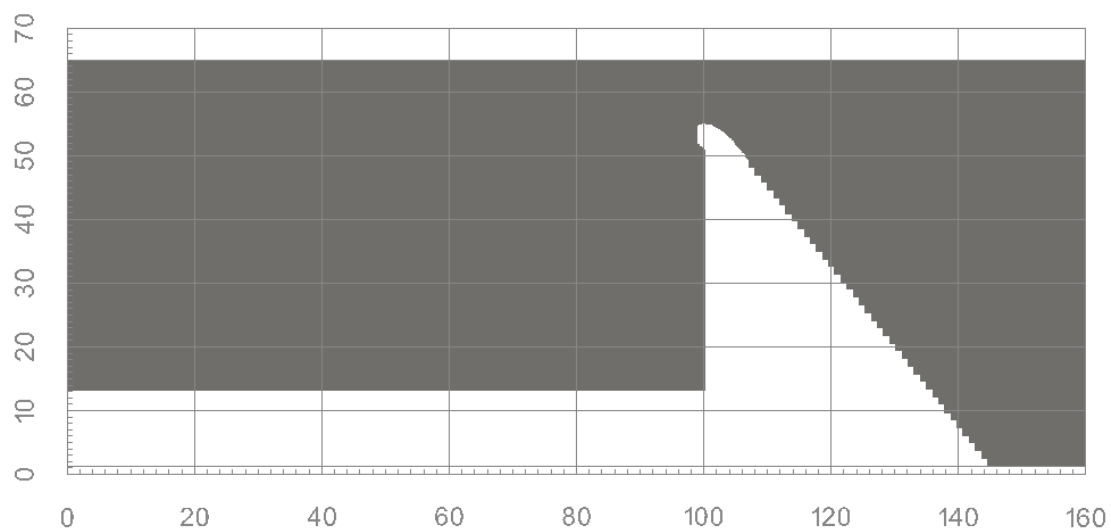


Figura 8 - Geometría construida en el modelo numérico.

En la siguiente figura se presenta un detalle de la malla de discretización en las cercanías de los escalones de la rápida.

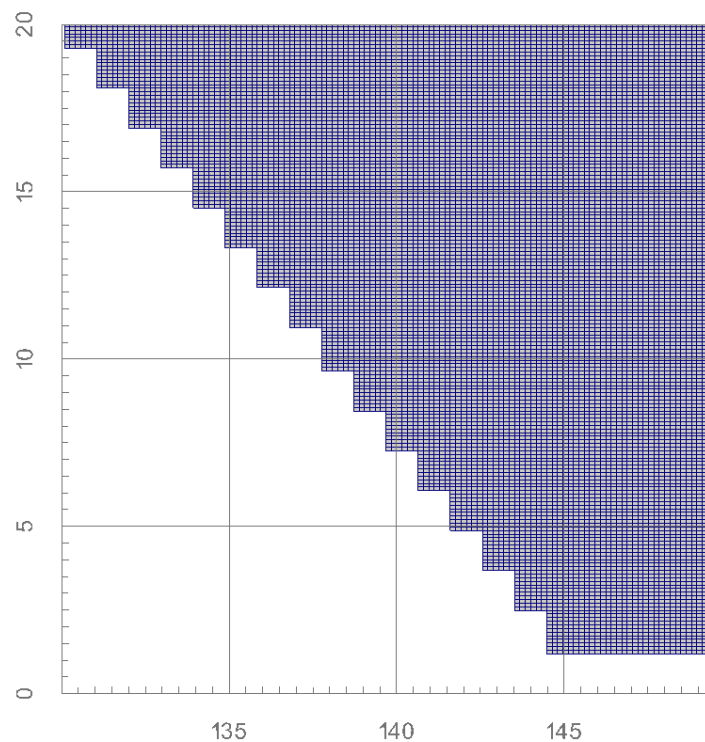


Figura 9 - Detalle de la malla estructurada

Validación del modelo numérico

En primer lugar, se realizaron corridas para diferentes caudales específicos de manera de validar los resultados obtenidos contra valores experimentales y mediciones sobre el modelo físico.

En la siguiente figura se presenta la curva de descarga del vertedero principal obtenida mediante la modelación física (rojo) junto con los resultados obtenidos en la modelación numérica (verde). Adicionalmente se presenta la curva de descarga estimada mediante el método del U.S. Bureau of Reclamation (USBR) que muestra un acuerdo satisfactorio con los datos medidos.

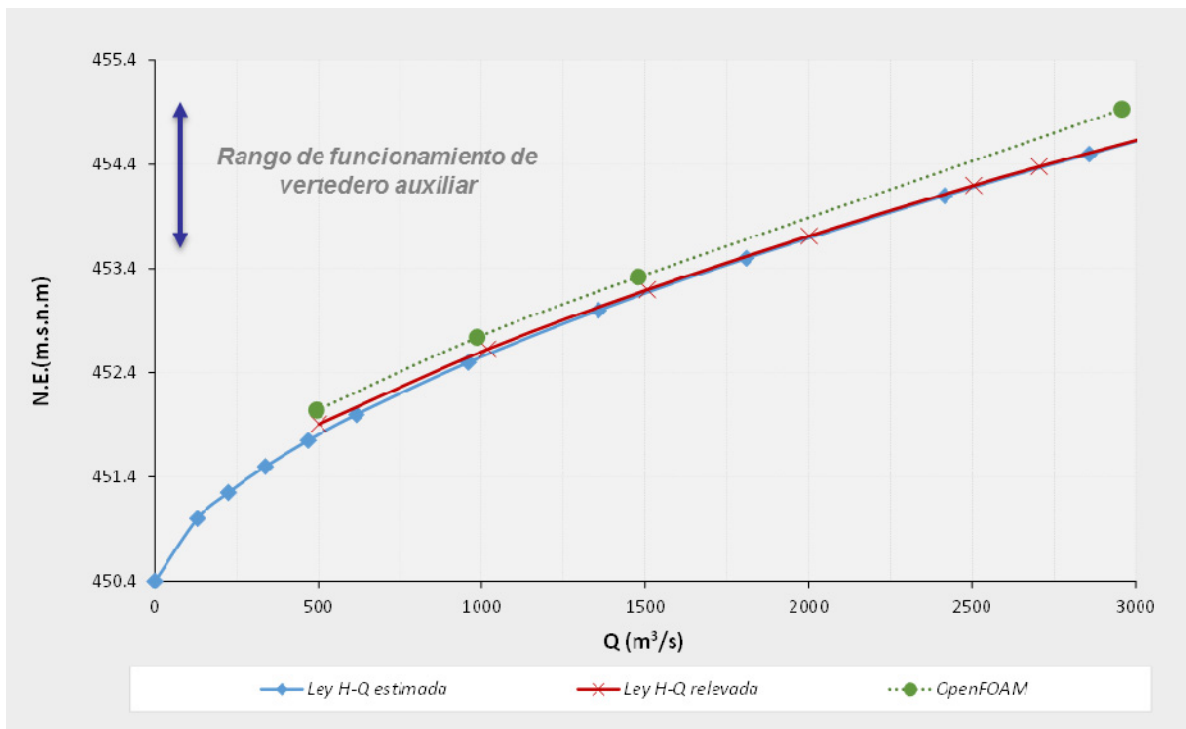


Figura 10 - Curvas de descarga

Se observa un buen acuerdo en la tendencia de los niveles de carga sobre el vertedero, aunque un tanto por encima de los valores experimentales. Esto podría deberse a efectos introducidos por la malla cercana a las paredes de la cresta, la cual presenta un tamaño de elementos de 12cm. La sensibilidad a la malla no está comprendida dentro del presente trabajo.

Los resultados de la modelación numérica arrojan una aparente menor eficiencia del vertedero principal, pero debe recordarse que a partir de la cota 453,4msnm el vertedero auxiliar entra en funcionamiento situación que no fue representada en la modelación.

Simulaciones

Con el objetivo de verificar la posibilidad de representación de los diferentes tipos de escurrimientos sobre la estructura escalonada, se realizaron simulaciones bajo caudales específicos menores, lo que corresponde a una situación de Flujo en Láminas. Verificó la correcta representación del escurrimiento a chorros de escalón en escalón, como puede verificarse en la siguiente figura.

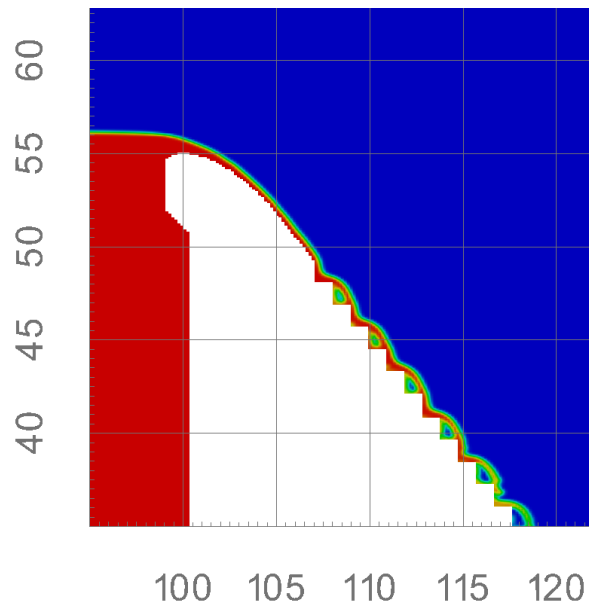


Figura 11 - Flujo en láminas simulado con OpenFOAM para bajos caudales específicos

De la misma manera se verificó el funcionamiento de la estructura para caudales mayores, correspondiente a un Flujo en Superficie, donde se presenta un claro escurrimiento superior en la zona libre de escalones, con núcleos de recirculación en cada escalón. La siguiente figura señala este comportamiento hidráulico.

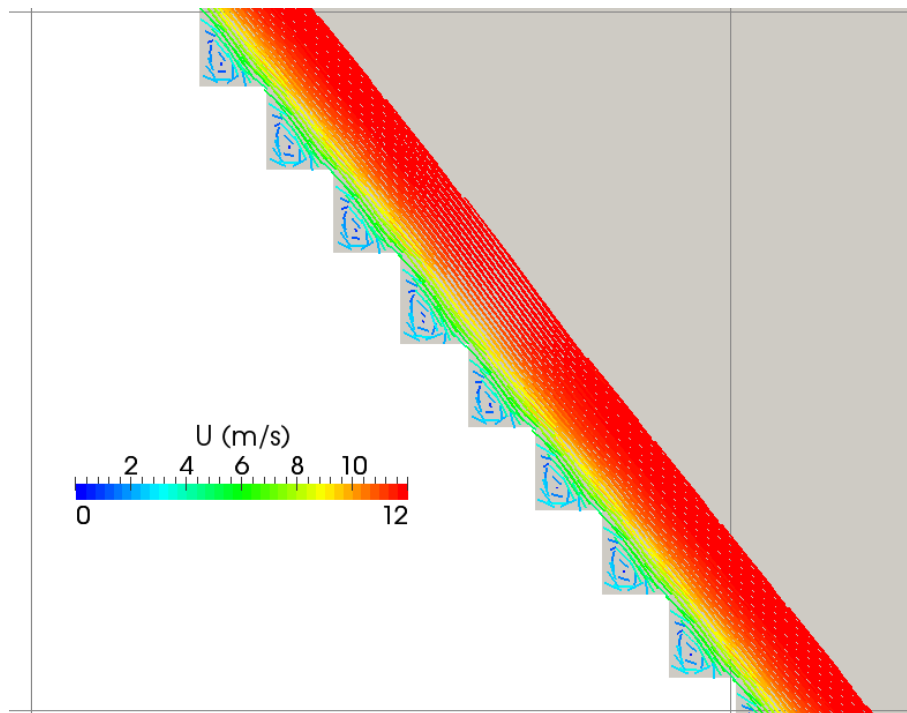


Figura 12 - Flujo en superficie simulado. Obsérvese la vorticidad presente en cada escalón

A continuación se presenta un detalle de la zona de recirculación en los escalones y el flujo superior o en superficie por encima de aquellos.

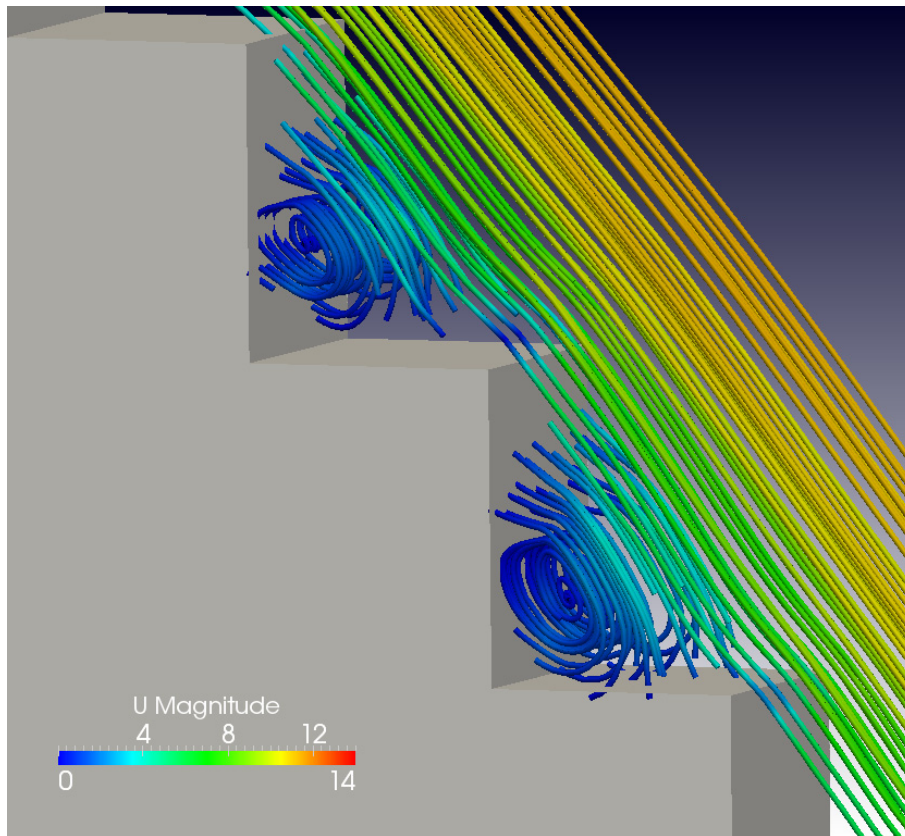


Figura 13 - Flujo en superficie - Detalle de recirculación en escalones y flujo superficial; Velocidad en m/s.

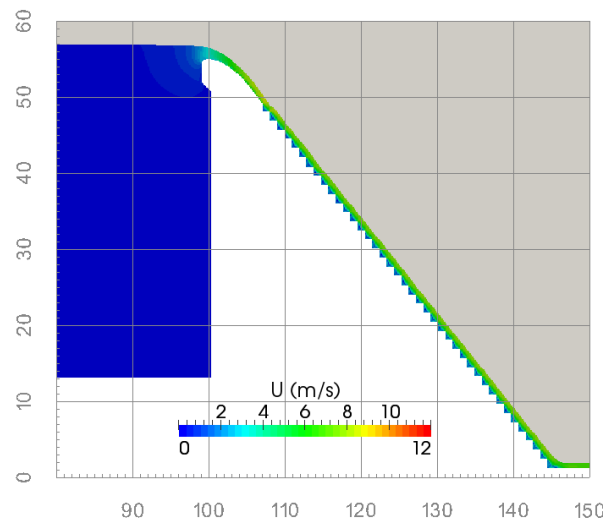
Escenarios simulados

De manera de obtener una cantidad de resultados que permita comparar los mismos contra mediciones en modelo físico o bien relaciones analíticas, se simularon los siguientes escenarios de caudales, con la energía correspondiente en el embalse.

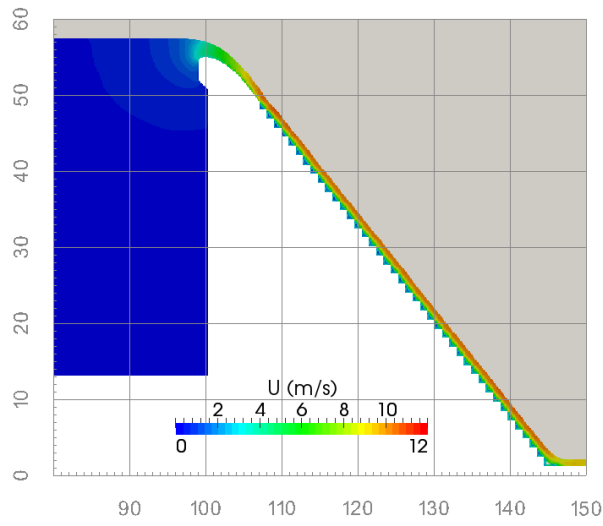
Tabla 1 - Escenarios simulados en modelo numérico

Escenario	Caudal (m³/S)	Energía en embalse (m)
1	494.9	56.64
2	986.3	57.34
3	1479.5	57.92
4	2958.9	59.53

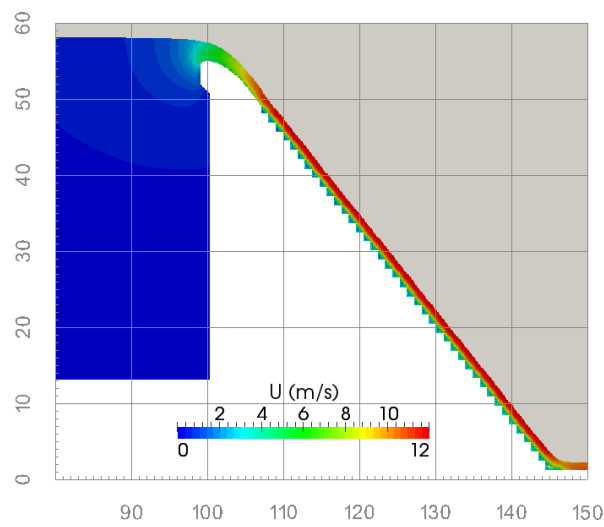
Las siguientes figuras presentan el escurrimiento sobre la rápida y la carga sobre el vertedero para los tres primeros escenarios simulados (donde la cota del vertedero auxiliar no es alcanzada).



(a) – Escenario 1 - $Q=495\text{m}^3/\text{s}$



(b) Escenario 2 - $Q=986\text{m}^3/\text{s}$



(c) Escenario 3 - $Q=1480\text{m}^3/\text{s}$

Figura 14 - Flujo sobre la rápida y carga sobre el vertedero para los tres escenarios simulados

Disipación de Energía

Como se explicó anteriormente, la pérdida sobre la rápida escalonada puede estimarse analíticamente mediante la fórmula de Darcy-Weisbach, adoptando un coeficiente de fricción f . Se presenta a continuación el rango de variación de la energía disipada, en el caso del vertedero principal, para valores extremos de aquel coeficiente.

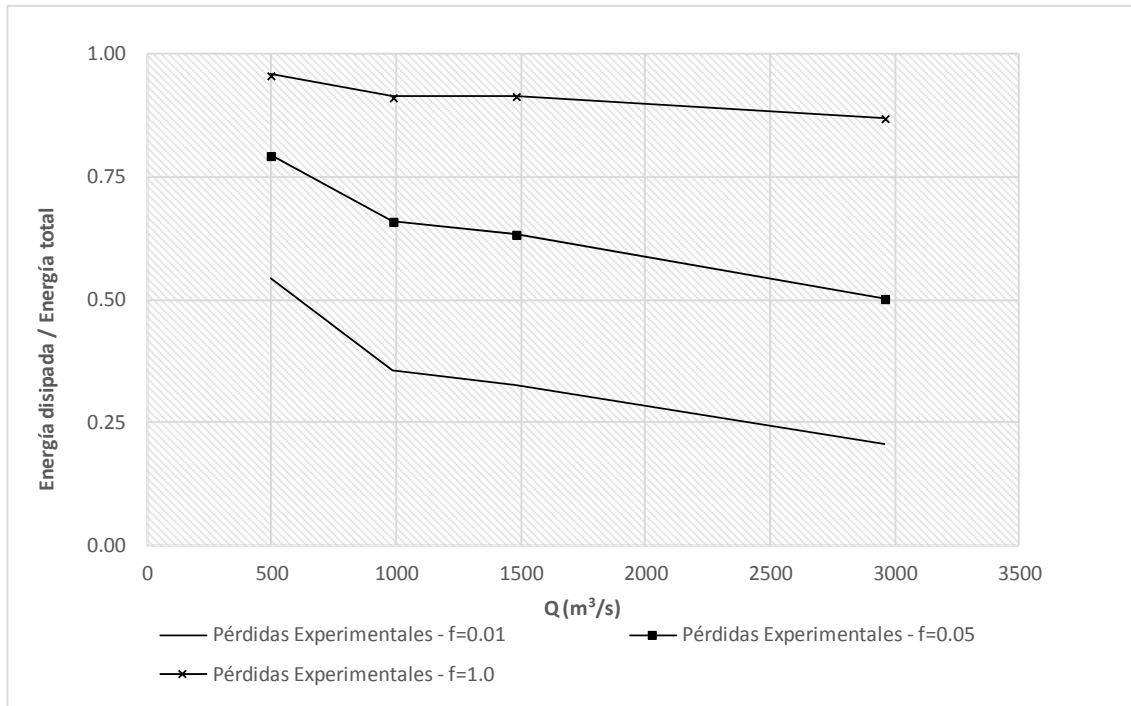


Figura 15 - Pérdidas de energía para flujos de superficie en función del coeficiente de fricción f

Puede observarse que la energía disipada para valores de f presentes en rápidas escalonadas ($f > 0.05$) varía entre el 75% y el 95% para caudales bajos y entre el 50% y el 80% de la energía total para caudales superiores. Esto demuestra la gran capacidad disipadora de estas estructuras, frente a la energía disipada en rápidas lisas, representada en este gráfico por un valor de f más bajo ($f=0.01$).

En el caso del modelo numérico, la energía cinética disipada a lo largo de los escalones presentes en la rápida se estima comparando la energía inicial sobre la cresta del vertedero, con una componente potencial principal, contra la energía disponible al pie de la rápida con una componente cinética mucho más importante.

Para lograr este propósito, se integran el flujo de energía en el área de escurrimiento en una sección representativa del embalse (70m aguas arriba de la cresta) y el pie de la rápida, obteniendo de esa manera el tirante y la magnitud media de la velocidad para toda la sección de análisis.

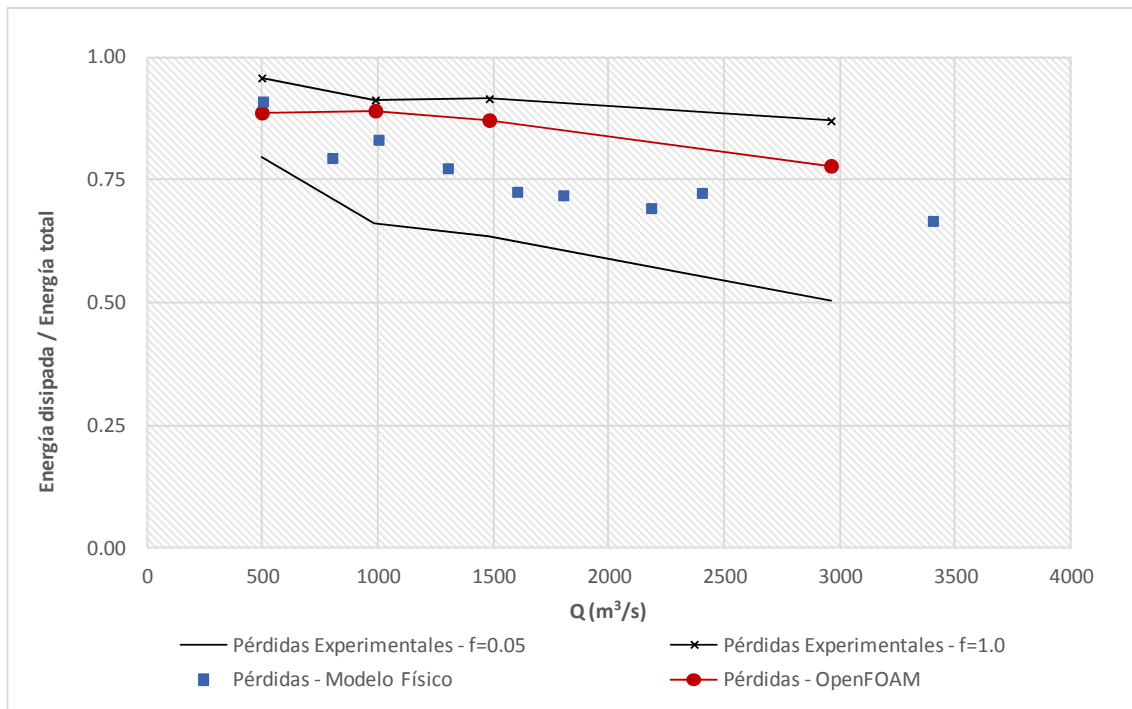


Figura 16 - Pérdidas de energía, comparación entre modelo físico y resultados numéricos

La energía disipada obtenida a través del modelo numérico resulta un tanto superior a las mediciones en modelo físico para caudales medios y altos, aunque para el caudal mínimo de 500m³/s el error es menor.

CONCLUSIÓN

La disipación de energía sobre las rápidas escalonadas resulta evidentemente superior a las rápidas lisas, y esto presenta una ventaja indiscutible para estos tipos de estructuras, donde el objetivo es erogar los caudales durante las crecidas garantizando la seguridad estructural de la obra de embalse.

A través del modelo numérico se pudo representar los tipos de flujo característico en estas estructuras: el flujo en láminas y el flujo en superficie, obteniéndose un ajuste aceptable con la curva de descarga teórica y del modelo físico, teniendo en cuenta que se trata de un modelo bidimensional.

En cuanto a la disipación de energía obtenida a través de las simulaciones numéricas también se logró un buen ajuste sobre los datos de modelación física, aunque con valores algo superiores.

En el futuro se analizarán los efectos de cavitación en las rápidas para estudiar la relación entre los índices de cavitación y las configuraciones geométricas y de descarga sobre el vertedero.

Agradecimientos

Departamentos de Hidráulica, Construcciones y Estructuras, Facultad de Ingeniería, U.B.A. Al Programa de Obras Hidráulicas del Laboratorio de Hidráulica Aplicada del INA, en especial a Claudio Fattor y Daniel Bacchiega, por los datos de modelo físico.

REFERENCIAS

- Bacchiega J. D., Fattor, C. A. (2006) – “Estudio del vertedero escalonado de la presa El Bolsón, Catamarca“, en IV Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos, Misiones, Argentina.
- Chamani, M. R.; Rajaratnam, N. (1994). “Jet flow on stepped spillways.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(2), 254–259.
- Chanson, H. (2001) – “Hydraulic Design of Stepped Spillways and Dowsntream Energy Dissipators”, en *Dam Engineering*, Vol. 11, No 4, pp 205.242.
- Chanson, H. (1994) – “Hydraulic of Nappe Flow Regime above Stepped Chutes and Sillways”, en *Australian Civil Engineering Transactions*, IEAust, Vol. CE6No 1. Australia.
- Chinnarasri, C. (2002). “Assessing the flow resistance of skimming flow on the step faces of stepped spillways.” *Dam Engineering*.
- González, C. A., Chanson, H. (2007) – “Diseño hidráulico de vertederos escalonados con pendientes moderadas: metodología basada en un estudio experimental”, México.
- Hirt, C.W.; Nicholls, B.D. (1981). “Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries”. *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201-225.
- Khatsuria, R. M. (2005) – “Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators.” Marcel Dekker, Estados Unidos.
- Matos, J.; Quintela, A. (1995). Discussion of “Jet flow on stepped spillways”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(5), 443–444.
- Rajaratnam, N. (1990). “Skimming flow in stepped spillways.” *Journal of Hydraulic Engineering*. 116(4), 587–91.
- Simoes, A. L. A., et al. (2012) – *Stepped Spillways: Theoretical, Experimental and Numerical Studies*, Universidad de San Pablo, Brasil.
- Tozzi, M. J. (1994). “Residual energy in stepped spillways.” *International Water Power and Dam Construction*.