

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**MEDICIÓN DE PRESIONES DE IMPACTO EN  
CÁMARA DISIPADORA DE ENERGÍA  
PARA VÁLVULA HOWELL-BUNGER**

*José Miguel Espinoza; Enrique Rosa*

*Instituto Nacional de Hidráulica. Concordia 0620, Peñaflores, Chile. [jespinoza@inh.cl](mailto:jespinoza@inh.cl) ; [erosa@inh.cl](mailto:erosa@inh.cl)*

**RESUMEN:** Se presentan las mediciones realizadas en un modelo físico escala 1:15 de las presiones de impacto en el techo de una cámara disipadora de energía para una válvula Howell-Bunger. Una parte importante del trabajo fue el desarrollo de un dispositivo especial de medición para registrar con la precisión requerida las presiones de impacto, un problema bastante complejo considerando las altas velocidades de la descarga. El análisis de los datos permite complementar las conclusiones de Hepler y Peck (1989) respecto a los valores de las presiones hidrodinámicas, ya que mediante el dispositivo de medición fue posible verificar la existencia de una distribución de presiones semejante a la observada por Beltaos (1976) para el caso de un chorro plano impactando de manera oblicua a una superficie plana. Los resultados del modelo permitieron elaborar recomendaciones para el diseño de la estructura disipadora de energía, principalmente en relación a la distribución espacial de las presiones debidas al impacto del chorro y sus valores máximos.

**ABSTRACT:** Measures in a 1:15 physical model of the impact pressures in the roof of an energy dissipation structure for a fixed-cone valve are presented. An important issue of the work was the development of a special measure device to record with the required accuracy the impact pressures, a complex problem considering the high velocity of the discharge. Analysis of laboratory information allows to complement the conclusions of Hepler and Peck regarding to the values of hydrodynamics pressures, because using the measure device was possible to check the existence of pressure distributions similar to the watched by Beltaos (1976) in a oblique impingement of a plane turbulent jet. Results of the model were used to propose design recommendations to the energy dissipation structure, specially regarding to the spatial distribution and maximum values of the impact pressures due to jet impact.

**PALABRAS CLAVES:** Modelo físico, válvula Howell-Bunger, presiones de impacto.

## INTRODUCCIÓN

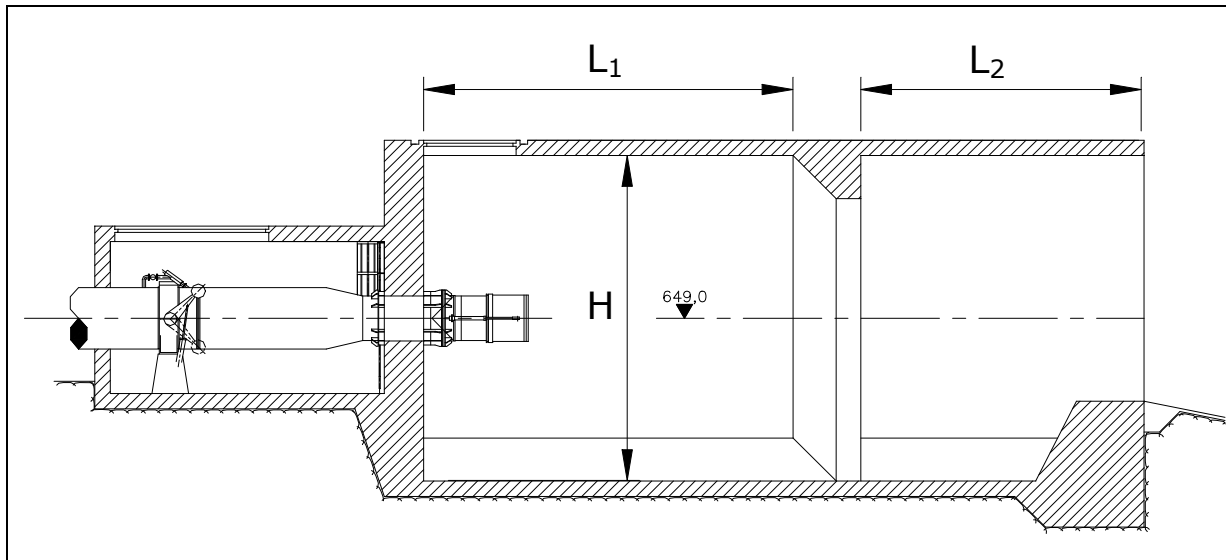
La válvula HB (o de cono fijo) es utilizada comúnmente en desagües de fondo de embalses y como control para evitar los efectos del “golpe de martillo” en grandes instalaciones de bombeo. La geometría del cuerpo de la HB transforma la descarga proveniente de la tubería en un chorro cónico con gran incorporación de aire, lo que le permite disipar una gran energía cinética en distancias relativamente cortas en comparación con otro tipo de desagües (Renna, Pizzutolo y Manso, 2006). La regulación de la descarga se realiza mediante un cilindro concéntrico al cuerpo de la válvula, cuyo movimiento hacia aguas abajo cierra la abertura existente entre el cilindro y el cuerpo. Usualmente, por restricciones de espacio, es necesario concentrar la descarga, para lo que se utiliza una especie de “capucha” sobre el cuerpo de la válvula, denominado anillo concentrador. Sin embargo, de acuerdo con las indicaciones de distintos fabricantes (ej.: Rodney Hunt Company), el anillo concentrador posee restricciones para su utilización, puesto que se ha comprobado que por sobre los 53 metros de carga neta sobre la válvula, se generan problemas de vibraciones y cavitación.



**Figura 1.-** Izquierda: Descarga libre de una válvula HB. Timothy Lake Dam, Arizona, E.E.U.U.. Derecha: Descarga con anillo concentrador. Glen Canyon Dam, Arizona, E.E.U.U..

La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) del Gobierno de Chile tiene considerado dentro de su cartera de proyectos el Embalse Punilla, emplazado en la VIII Región del país e impulsado con fines de generación hidroeléctrica y de riego. Precisamente, asociado a las obras de entrega para riego, el diseño del embalse incluye dos válvulas Howell-Bunger (HB). La descarga a través de las válvulas está pensada como alternativa para aquellas situaciones en que las turbinas generadoras de la central estén fuera de uso, por mantención o falla, de tal manera de que se mantenga una entrega constante total por parte del embalse de  $104 \text{ m}^3/\text{s}$ , es decir,  $52 \text{ m}^3/\text{s}$  por cada turbina y/o válvula.

Dado que para el caso del Embalse Punilla, las cargas máximas estimadas sobre las válvulas HB son del orden de 75 metros, fue necesario descartar la utilización de un anillo concentrador e incorporar el uso de dispositivo alternativo para contener la descarga. De esta manera, a partir del trabajo presentado Hepler y Peck (1989), se diseñó una estructura disipadora de energía como la que se muestra en la Figura 2, la que consiste en una cámara de hormigón compuesta por 2 vanos separados por dientes deflectores; en el primer vano, revestido en acero, se recibe el impacto del chorro descargado por la válvula, donde se dispone de una ventanilla de aireación que permita la suplir la demanda de aire generada por el chorro eyectado a gran velocidad. El segundo vano tiene como objetivo uniformar el flujo antes de su salida de la cámara. Para el caso específico del Embalse Punilla, el diseño original consideró que la longitudes indicadas en la figura son:  $L_1=13,6 \text{ m.}$ ,  $L_2= 11,4 \text{ m.}$  y  $H=10,6 \text{ m.}$ , teniendo en cuenta que la válvula posee un diámetro de 1,55 metros. El ancho de la cámara es de 10 metros. La totalidad del diseño del proyecto, incluyendo el diseño de esta cámara, fue adjudicada a la firma EDIC Ingenieros Ltda. por parte de la DOH.

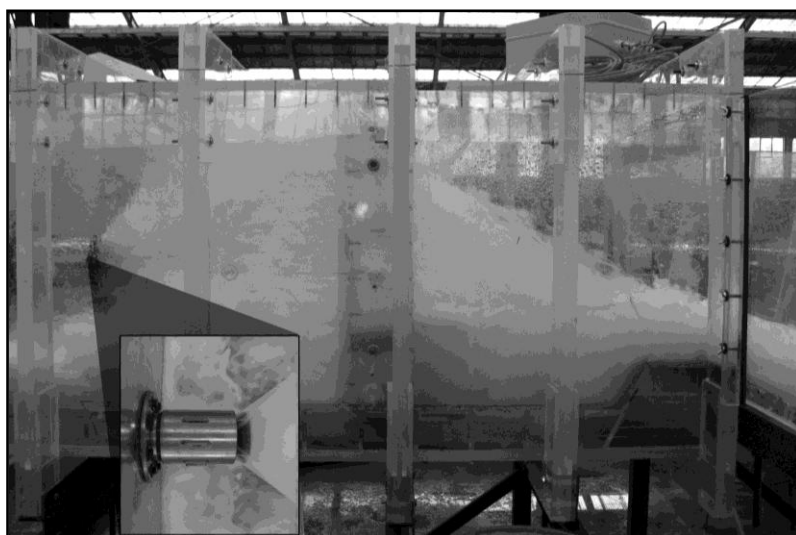


**Figura 2.-** Esquema de diseño de la cámara disipadora de energía (EDIC, 2004).

A partir de las recomendaciones realizadas por EDIC, la DOH estimó conveniente estudiar mediante un modelo físico escala 1:15 y a similitud de Froude, el comportamiento hidráulico en general de la cámara disipadora de energía, trabajo que fue realizado en el laboratorio del Instituto Nacional de Hidráulica (INH). Dentro de los objetivos específicos del modelo, se incluyó la estimación de las presiones de impacto debidas a la descarga del chorro proveniente de la válvula.

En el siguiente trabajo se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la estimación de las presiones hidrodinámicas debidas al impacto del chorro descargado por la válvula en el techo de la estructura. Como parte fundamental del trabajo fue necesario desarrollar una técnica de laboratorio que permitiera capturar con la precisión requerida la variable en estudio, situación que resultó ser bastante compleja dadas las altas velocidades del flujo descargado por la válvula. Por otro lado, el análisis de los datos permite complementar las conclusiones de Hepler y Peck respecto a los valores de las presiones hidrodinámicas, puesto que mediante el dispositivo de medición confeccionado fue posible verificar la existencia de una distribución de presiones semejante a la observada por Beltaos (1976) para el caso de un chorro plano impactando de manera oblicua a una superficie plana.

Las experiencias desarrolladas permitieron elaborar recomendaciones complementarias para el diseño de esta estructura, principalmente en relación a la distribución de las presiones debidas al impacto del chorro y sus valores extremos.



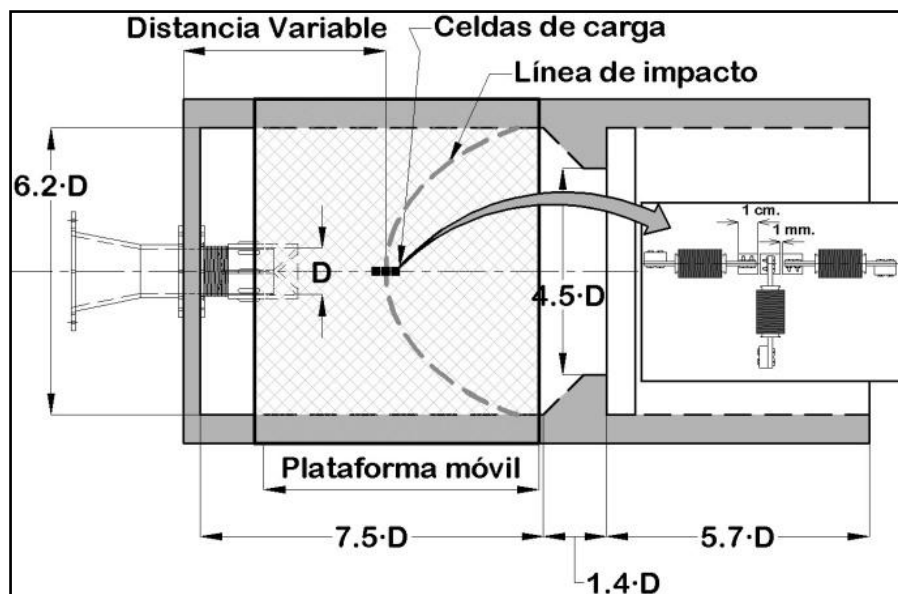
**Figura 3.-** Modelo físico de la cámara disipadora de energía y válvula HB.

## OBJETIVOS

El objetivo del trabajo consistió en desarrollar una técnica de laboratorio que permitiera medir con precisión la magnitud de las presiones de impacto debidas a la descarga de la válvula HB en el cuerpo de la estructura disipadora de energía, para posteriormente realizar un análisis de los resultados obtenidos y así, finalmente, poder entregar recomendaciones para el diseño de este tipo de dispositivos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La Figura 4 muestra un esquema en planta del modelo físico de la cámara disipadora de energía, construido íntegramente en acrílico. El techo de la estructura consta, en su diseño original, de dos ventanillas de aireación, una de ellas ubicada al pie de la válvula, y la otra al comienzo del segundo vano de la cámara. Este techo se reemplazó por una plataforma móvil, en cuyo eje se han dispuesto, para la medición de las presiones de impacto, tres celdas de carga en línea, acoplados a placas de acrílico cuadradas de 1 cm. de lado, de tal manera que la separación entre las placas sea de 1 mm.. Se situaron las celdas de carga en esta posición considerando que la descarga impacta la estructura a lo largo de una trayectoria hiperbólica, alcanzando el impacto su máximo valor en torno al eje de la válvula proyectado sobre el techo y paredes de la cámara (Hepler y Peck, 1989).



**Figura 4.-** Esquema en planta del modelo físico y detalle de las celdas de carga.

Se seleccionaron celdas de carga de núcleo blindado y de arquitectura en puente de Wheatstone completo, de sus galgas elastoméricas, para la mínima influencia en la incertidumbre de sus mediciones, de la temperatura, luz ambiente y humedad. Las unidades escogidas, fue el modelo ALPHA LOAD BEAM, fabricado por Vishay BLH, con un rango de 50 N, bilateral. Se acoplaron a amplificadores diferenciales compensados, desarrollados por Danish Hydraulic Institute, alimentando los puentes de Wheatstone con 2Volts CC  $\pm 0.05\%$ .

El montaje en la estructura se realizó, en el extremo de apoyo, mediante robustas bases de acrílico, cuidando que el extremo sensor, con las placas de acrílico de  $1 \text{ cm}^2$ , presentaran el mínimo de tracción posible a la base, para evitar dos puntos de apoyo estructural, que introduciría esfuerzos no deseados por micro-deformación térmica y por las vibraciones propias de ésta. Para ello, se seleccionó como material de sello, una lámina de silicona de gran elasticidad.

La calibración de las celdas de carga se realizó con pesos patrones calibrados de 50 gramos, en tres puntos: 50, 100 y 150 gramos. Las mediciones se registraron mediante un sistema de adquisición de datos de alta velocidad. Se seleccionó el sistema INES DAQ 108, desarrollado por Team Solutions. Permite hasta 100KS/s en 12 bit de resolución.

La frecuencia de muestreo utilizada fue de 100 Hz., durante un lapso de 60 segundos en cada punto de medición, condiciones que se definieron luego de que no se encontraran diferencias con los resultados obtenidos a partir de mayores frecuencias de muestreo. Además, se tuvo en consideración a los trabajos desarrollados por Ervine, Falvey y Withers (1997), Fiorotto y Rinaldo (1992), Lopardo, De Lio y Vernet (1982) y Sauma Haddad, De Lio y Lopardo (1994), entre otros, para el estudio de las presiones fluctuantes en cuencos amortiguadores para resaltos hidráulicos, donde queda establecido, entre otras cosas, la independencia de las propiedades estadísticas de las presiones fluctuantes a partir de un número de Reynolds (Re) mayor que  $5 \times 10^5$ , y que las frecuencias dominantes de la misma variable se encontraban bajo los 25 Hz.. Si bien es reconocido que los modelos a similitud de Froude permiten una buena representación de los fenómenos hidráulicos donde predominan las fuerzas gravitatorias e inerciales utilizando escalas adecuadas y números de Reynolds lo suficientemente altos, el análisis estadístico de las presiones fluctuantes de un chorro impactando en una superficie plana u oblicua no tiene un procedimiento estandarizado como para el caso de los resaltos hidráulicos. Sin embargo, se estima que al utilizarse una escala generosa (1:15) y alcanzando en laboratorio un Re adecuado ( $7 \times 10^4$ ), el análisis estadístico de las fluctuaciones de las presiones de impacto en la cámara disipadora con las condiciones de muestreo señaladas puede ser utilizado como una herramienta valiosa para efectos de diseño, siempre teniendo en cuenta las restricciones asociadas a los efectos de escala.

Respecto al procedimiento utilizado para realizar las mediciones de presiones de impacto, este comenzó con una calibración previa del modelo en términos del funcionamiento hidráulico de la válvula. Siguiendo las recomendaciones de Hepler y Peck, la calibración se realizó a partir del coeficiente de gasto C asociado a cada apertura de la válvula, el cuál relaciona la carga neta y el caudal descargado mediante la siguiente relación:

$$Q_0 = C \cdot A_0 \cdot \sqrt{2g \cdot H_n} \quad [1]$$

Donde:

$Q_0$ : Caudal evacuado por la válvula ( $m^3/s$ )

$A_0$ : Área de la válvula HB definida por diámetro nominal ( $m^2$ )

$H_n$ : Carga neta sobre la válvula (m)

C: Coeficiente de gasto

El coeficiente de gasto C permite traspasar los valores desde el modelo al prototipo independientemente del valor de la abertura de la válvula. En este caso, fue posible representar el coeficiente de gasto hasta un valor de  $C=0,754$ , que se relaciona con la apertura teórica en prototipo de acuerdo a lo que se indica en la Tabla 1.

**Tabla 1.-** Relación modelo-prototipo asociada al coeficiente de gasto

C	a/D Modelo	a/D Prototipo	Apertura Prot. (%)
0,754	0,44	0,43	84,2
0,636	0,34	0,34	67,3
0,496	0,24	0,25	49,5
0,332	0,15	0,16	31,7

Definido el coeficiente de gasto, se procedió a la medición de las presiones de impacto en el techo de la estructura para 3 coeficientes de gasto y 3 caudales para cada coeficiente de gasto. La plataforma móvil mostrada en la Figura 4 permitió desplazar los sensores a lo largo de toda la zona de impacto, tomándose registro de las presiones cada 2 o 3 milímetros. La Tabla 2 resume los ensayos realizados.

**Tabla 2.-** Ensayos realizados

C	Caudal Modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Código Ensayo
0,31	21	18	C1,Q1
	24	21	C1,Q2
	29	25	C1,Q3
0,61	33	29	C2,Q4
	53	47	C2,Q5
	57	50	C2,Q6
0,72	39	34	C3,Q7
	50	44	C3,Q8
	57	50	C3,Q6

## RESULTADOS

La Figura 5 muestra una síntesis de los resultados obtenidos para los 3 coeficientes de gasto con 3 caudales evacuados en cada caso (Q6 se utilizó también para C3). Los valores mostrados corresponden al promedio de las presiones de impacto  $P_m$  (m) en términos de su valor relativo con respecto a la carga neta medida en la válvula  $H_n$ , la que se estima a partir de la siguiente expresión:

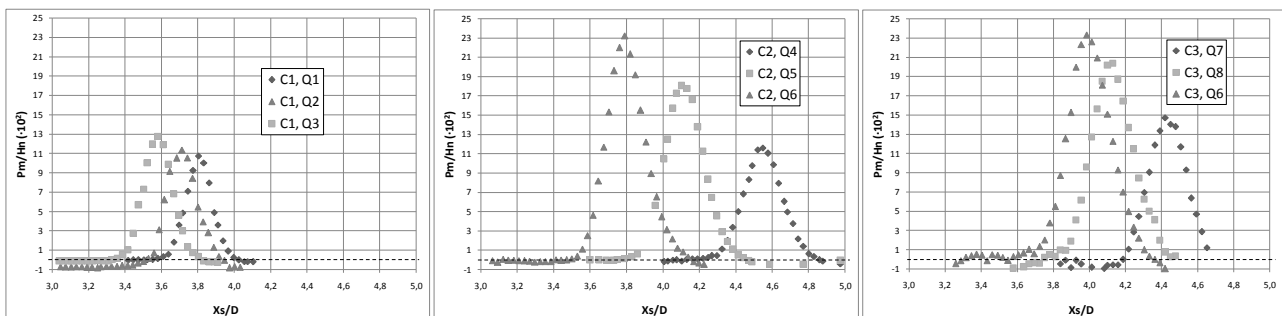
$$H_n = H_e + \frac{V_v^2}{2g} \quad [2]$$

Donde:

$H_n$ : Carga neta sobre la válvula (m)

$H_e$ : Carga estática aguas arriba de la válvula (m)

$V_v$ : Velocidad del flujo aguas arriba de la válvula (m)

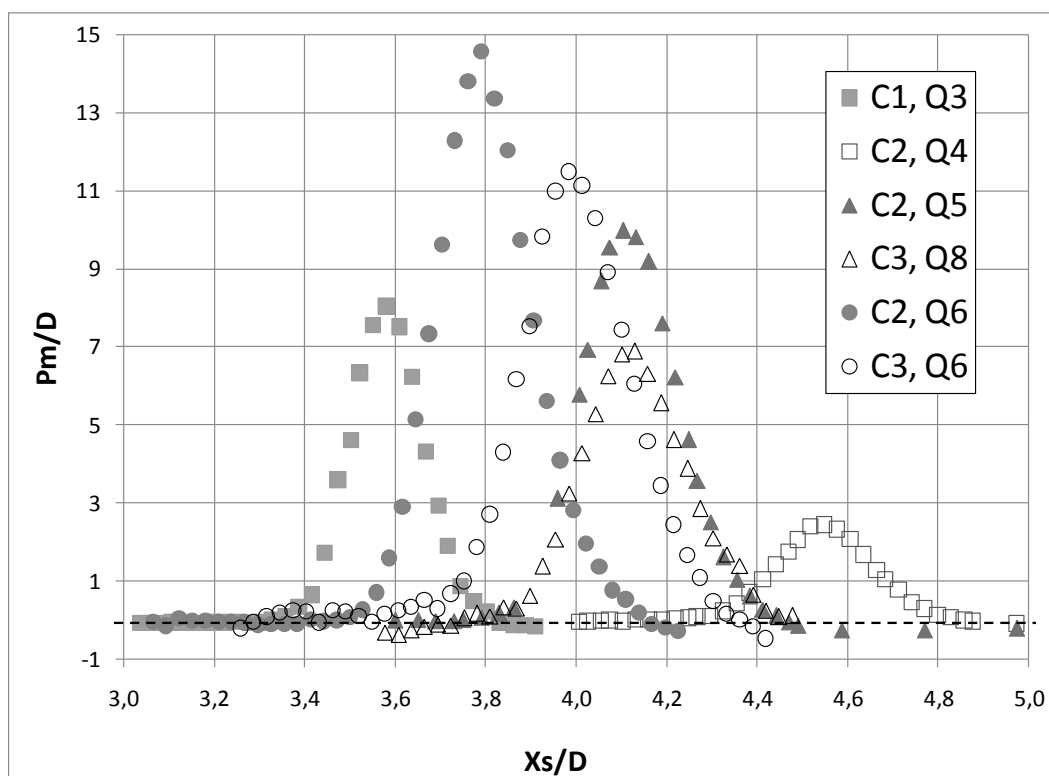


**Figura 5.-** Valores promedio de las presiones de impacto para cada coeficiente de gasto.

El eje de las abscisas ( $X_s/D$ ) muestra la posición relativa de la zona de impacto, en relación al diámetro  $D$  (m) de la válvula, en la dirección solidaria al eje, medida a partir del borde del cono de la válvula. La posición vertical de la zona de impacto medida desde el eje, para todos los casos mostrados, expresada en términos relativos respecto del diámetro, es igual a  $Y_s=3,4 \cdot D$ .

De las curvas mostradas en la Figura 5 se desprende que las presiones de impacto se distribuyen de una manera similar a la observada por Beltaos (1976) para el caso de un chorro impactando de manera oblicua en una superficie plana. El valor promedio de las presiones  $P_m$  alcanza un máximo que oscila entre un 10% y 25% de la carga neta sobre la válvula, dependiendo del caudal y coeficiente de gasto de cada caso. El ángulo del chorro evacuado por la válvula, medido en el punto de máximo impacto sobre el eje de la estructura, oscila entre los  $35^\circ$  y  $45^\circ$ . La zona de impacto se ubica a una distancia de 3 a 5 veces el diámetro de la válvula, medida a partir del borde del cono de esta; a medida que aumenta el caudal y manteniendo el coeficiente de gasto, la zona de impacto se desplaza hacia aguas arriba (se acerca a la válvula), incrementándose también el valor de las presiones.

Para comparar el valor medio de las presiones dependiendo del coeficiente de gasto, la Figura 6 muestra una gráfica del comportamiento de la variable  $P_m/D$ , en función de  $X_s/D$ . Se aprecia que un menor coeficiente de gasto, o, lo que es equivalente, una menor apertura de la válvula, genera condiciones más desfavorables desde el punto de vista de la magnitud de las presiones de impacto, comparando descargas similares. Por ejemplo, la combinación (C2, Q4) genera un valor máximo de  $P_m$  considerablemente menor que el generado por la combinación (C1, Q3), en circunstancias de que Q4 es levemente mayor que Q3. Asimismo, al comparar la distribución de presiones promedio para C2 y C3 durante la descarga de Q6, se observan valores significativamente mayores de  $P_m$  para C2.

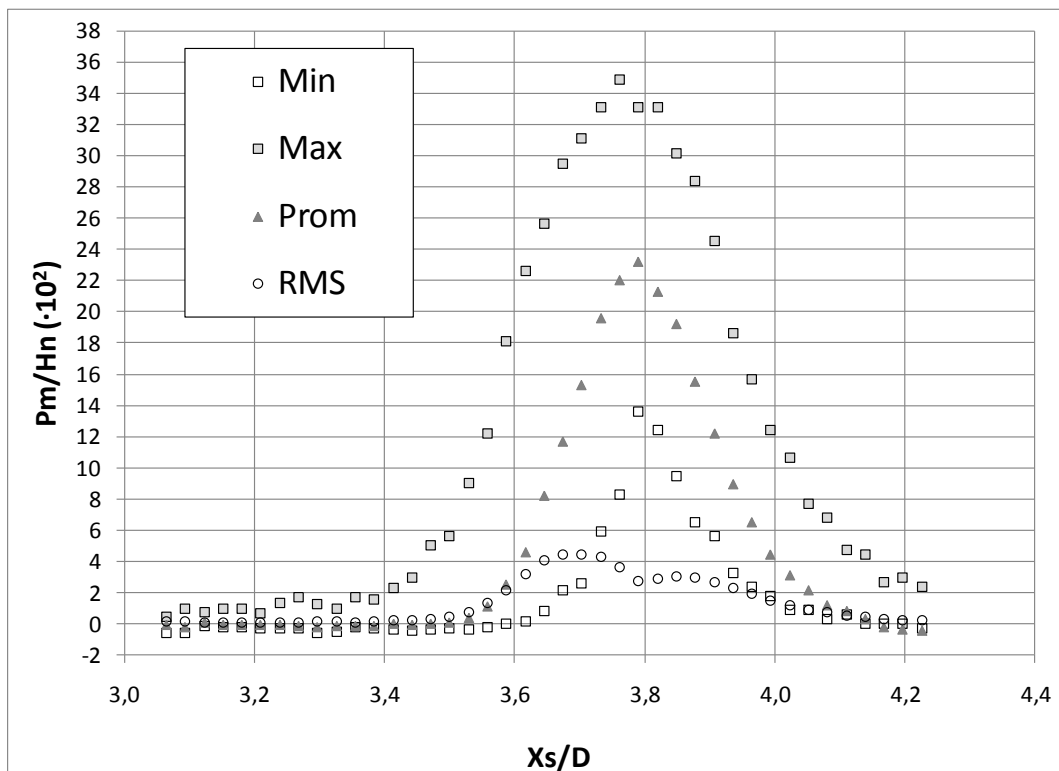


**Figura 6.-** Efecto del coeficiente de gasto en las presiones de impacto.

Las figuras 5 y 6 sugieren la presencia de presiones negativas en los extremos de las curvas de distribución de la presión de impacto, lo que es coincidente, al menos en el extremo aguas arriba, con las observaciones realizadas por Beltaos (1976), quien asoció estos valores negativos a la presencia de vórtices generados en esta región del impacto. Por otra parte, los valores negativos observados hacia aguas abajo pueden estar relacionados con el despegue de la lámina que sigue al impacto debido al efecto de la gravedad.

Como se mencionaba anteriormente, la disipación de energía por medio de resalto hidráulico se basa en la generación de turbulencia, la que viene asociada a importantes fluctuaciones de presión; al producirse, de manera intermitente pero continua, presiones negativas, las estructuras pueden sufrir severos daños por cavitación.

Es importante señalar que los modelos basados en la similitud de Froude no permiten reproducir el fenómeno de cavitación correctamente. Sin embargo, ha sido verificado, para el caso de los resaltos hidráulicos, que el análisis estadístico de las fluctuaciones de presión en este tipo de modelos puede entregar información valiosa respecto a la tendencia a la cavitación (Lopardo, De Lio y Vernet, 1982). Teniendo en cuenta las restricciones del caso, resulta conveniente estimar los estadísticos básicos de las fluctuaciones de las presiones de impacto en la cámara, considerando además que la escala utilizada permite minimizar los efectos parásitos de laboratorio. Desde el punto de vista del riesgo de cavitación en la estructura, este análisis es meramente cualitativo.



**Figura 7.-** Estadísticos básicos de las fluctuaciones de presión, para C2 y Q6.

La Figura 7 muestra los valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar (RMS) para las presiones de impacto asociados al coeficiente de gasto C2 y al caudal Q6, en términos de su valor relativo con respecto a la carga neta medida en la válvula Hn. Como se aprecia, si bien efectivamente se observan valores negativos para las presiones hacia los extremos de la zona de impacto, estos no alcanzan valores significativos, siendo menores al 1% de la carga neta Hn. El comportamiento de la desviación estándar muestra que las fluctuaciones de presión más importantes se producen en torno al peak de la distribución de las presiones de impacto, donde los valores son siempre positivos. Hacia los extremos, las fluctuaciones son bastante menores, lo que en resumen permite inferir que no existe un riesgo de cavitación aparente asociado al impacto del chorro en el techo de la estructura. Posiblemente, la incorporación de aire a través de la ventanilla, permite que las presiones se mantengan cercanas a la atmosférica, lo que otorga además un factor de seguridad a la estructura considerando que la incorporación de aire en el modelo está subestimada.

Cabe señalar que el comportamiento de estos mismos parámetros estadísticos para el resto de los casos estudiados es muy similar al observado en la Figura 7.



## CONCLUSIONES

El trabajo realizado permite caracterizar la magnitud y distribución de las presiones de impacto en el techo de la cámara disipadora de energía debidas a la descarga del chorro desde la válvula HB. Se ha determinado que el valor de las presiones y la extensión de la zona de impacto para el techo de la estructura ubicado a una distancia con respecto al eje igual a  $Y=3.4 \cdot D$  dependen del diámetro, la carga neta y el coeficiente de gasto (o abertura) de la válvula.

Los resultados del modelo permitieron estimar los valores máximos de presión a los que se ve sometido el techo de estructura. Por otra parte, se determinó que el diseño de la cámara, que incluye una ventanilla de aireación, permite mantener la zona de impacto sin riesgo de cavitación aparente. Sin embargo, teniendo en cuenta que se registraron valores negativos de presión, se consideró apropiado el revestimiento de acero especificado en el diseño.

Al igual que todos los modelos físicos, los resultados mostrados pueden estar influenciados de alguna manera por la reducción a escala del fenómeno analizado. Para este caso, se estima que existen efectos de escala debido a la incorporación de aire en el chorro descargado por la válvula, el cual será mayor en el prototipo. Este hecho tendría dos consecuencias: los valores de las presiones máximas podrían estar sobreestimados, mientras que la zona de impacto podría estar subestimada. Sin embargo, dado que se trabajó con una escala bastante generosa (1:15), se estima que estos efectos no son significativos.

Futuras investigaciones relacionadas con las válvulas HB y la cámara disipadora de energía debieran orientarse a: (i) la caracterización de las frecuencias dominantes de las presiones de impacto en la estructura, (ii) análisis de la variación de las presiones de impacto a mayor y menor distancia de la válvula y (iii) verificación en prototipo de los resultados obtenidos en laboratorio.

Cabe destacar el desarrollo de una técnica de laboratorio sencilla pero a la vez efectiva y precisa para determinar las presiones de impacto debido a chorro impactando en una superficie sólida. Este fenómeno existe en una serie de problemas de ingeniería, por lo que su aplicación resulta bastante útil desde el punto de vista experimental.

## REFERENCIAS

- Beltaos, S.** (1976). "Oblique impingement of plane turbulent jets". *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 102, No. HY9, Sept 1976, pp. 1177-1192.
- Beichley, G.L.** (1970). "Hydraulic model studies of the energy dissipater for a fixed-cone valve at the Ute Dam outlet works". Hydraulic Branch Report, REC-OCE-70-11, Bureau of Reclamation, Mar. 1970.
- Colgate, D.** (1963). "Hydraulic model studies of the river outlet works at Oroville Dam". Hydraulic Branch Report, Hyd-508, Bureau of Reclamation, Oct. 1963.
- EDIC Ingenieros Ltda.** (2004). "Diseño del Embalse y Central Punilla". Informe Final para la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Ervine, D.A., Falvey, H.T. y Withers, W.** (1997). "Pressure fluctuations on plunge pool floors". *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 35, No. 2, pp. 257-279.
- Fiorotto, V. y Rinaldo, A.** (1992). "Turbulent pressure fluctuation under hydraulic jumps". *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 30, No. 4, pp. 499-520.
- Hepler, T.E. y Peck, H.W.** (1989). "Energy Dissipation Structure for Fixed Cone Valves". *Proceedings of the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering*, New Orleans, Louisiana, pp. 956-961.
- Instituto Nacional de Hidráulica** (2009). "Proyecto Embalse Punilla. Modelo hidráulico para el evacuador de crecidas y las obras de entrega a riego". Informe Final para la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Lopardo, R.A., De Lio, J.C. y Vernet, G.F.** (1982). "Physical modeling on cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump". *International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineer Structures*, BHRA Fluid Engineering, Coventry, England, pp. 109-122.

- Peck, H.** (1986). "Hydraulic model of fixed-cone valve energy dissipator. Central Arizona Project Bypass Structure, Wadell Pumping-Generating Plant". PAP 502, Bureau of Reclamation, Aug. 1986.
- Renna, F.M., Pizzutolo, O. y Manso, P.A.** (2006). "Dynamic behavior of jets issued from Howell-Bunger valves". *International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures*, J. Matos and H. Chanson (Eds), Report CH61/06, Div. of Civil Eng., The University of Queensland, Brisbane, Australia, pp. 11-20.
- Sauma Haddad, J.C., De Lio, J.C. y Lopardo, R.A.** (1994). "Estimación de esfuerzos dinámicos aleatorios actuantes sobre losas de cuencos amortiguadores". *XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Santiago, Chile, pp. 441-450.