

Análisis experimental del flujo combinado superior e inferior en una compuerta plana

Marco Castro Delgado
Ximena Hidalgo Bustamante

Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Por medio de una investigación experimental se analiza el problema del flujo simultáneo superior e inferior en una compuerta plana vertical. Se desarrolla el esquema que, para la determinación del caudal total combinado es válido para la subdivisión del mismo en dos partes: a) el caudal correspondiente al flujo libre superior de un vertedor de pared plana vertical con una altura ficticia y b) el caudal bajo una compuerta plana, con flujo de aproximación bajo presión, ubicado en el interior de un túnel, con una altura ficticia hacia aguas arriba. La definición real de la línea de separación entre los dos flujos es uno de los objetivos más importantes del presente estudio experimental. En el análisis comparativo de los resultados experimentales se toman en cuenta experiencias anteriores de casos particulares y más simples respecto del flujo combinado. La investigación en laboratorio valida totalmente el esquema teórico planteado para el análisis y permite elaborar diagramas de diseño hidráulico para este tipo de estructuras.

Palabras clave: compuerta plana, flujo superior libre, flujo inferior en un túnel, flujo combinado, análisis dimensional, separación de flujos, coeficientes de descarga y de momento.

Introducción

En los planes de regulación y control del flujo en cauces naturales, con mucha frecuencia se presenta la necesidad de levantar el nivel de la superficie libre del agua por medio de una estructura de cierre a todo lo ancho del cauce en condiciones normales y de estiaje. Sin embargo, esta estructura debe permitir el paso de los caudales extraordinarios, manteniendo, de ser posible, el mismo nivel de la superficie libre hacia aguas arriba. Es decir, en época de lluvias debe mantenerse una apertura total de la sección transversal del cauce para eliminar un efecto de obstrucción que provoca el embalsamiento del agua.

Una solución común en estos casos es disponer en el sitio de una estructura de compuertas móviles. Para permitir el flujo inferior se utilizan compuertas planas con movimientos verticales, mientras que para permitir el flujo superior, se dispone de compuertas de abatimiento o clapetas, con movimientos circulares alrededor de un eje. Un esquema de este tipo de obra hidráulica se muestra en la ilustración 1.

Desde el punto de vista hidráulico, una ventaja importante de esta estructura es la posibilidad de una regulación fina, en conjunto con la evacuación de mate-

rial flotante por sobre la clapeta para caudales normales. Otra gran ventaja es la recuperación de la sección transversal de flujo para caudales extraordinarios mediante el levantamiento total de la compuerta inferior. Por lo tanto, las operaciones de mantenimiento y de limpieza del cauce son menos costosas. Se aprovecha el efecto del vertido superior del agua como un mecanismo de transporte y evacuación del material flotante, lo que en el caso de los cierres fijos conduce a una importante reducción de la eficiencia de la estructura y a graves obstrucciones o taponamientos.

En el presente artículo se examina el caso de un flujo simultáneo combinado superior e inferior. En la literatura técnica existe abundante información sobre el flujo de vertido superior y sobre el flujo bajo una compuerta, por separado. Con la ayuda de esta información se buscan definir, de ser posible, las características del flujo simultáneo superior e inferior. Se hace válido el esquema de la red de flujo con la presencia de un fondo falso para la evaluación parcial del flujo superior y de un túnel de altura ficticia para la determinación complementaria del flujo inferior.

Estudios preliminares sobre un diagrama propuesto por Voigts para definir el flujo combinado superior e inferior de una compuerta plana en el texto de *Hidrome-*

condiciones de presión del volumen de aire bajo la lámina vertiente (la misma que incide en la geometría de la superficie libre inferior); los parámetros adimensionales Re y We califican la importancia relativa de las fuerzas de viscosidad y de tensión superficial con respecto a las de inercia, y el número de cavitación Ka evalúa el riesgo potencial de cavitación sobre el contorno sólido. También deben considerarse relevantes las variables independientes que definen la geometría del vertedor móvil, la geometría del contorno y del labio inferior de la compuerta, la geometría del cuenco aguas abajo y, fundamentalmente, las condiciones geométricas e hidrodinámicas del flujo en la zona de aproximación a la estructura tanto para la determinación de los caudales parciales como para la de las fuerzas generadas por el flujo del agua.

Similitud dinámica restringida

La relación funcional (ecuación 1) se reduce sobre la base de las siguientes consideraciones:

- El efecto de la viscosidad se muestra tanto a través de las pérdidas de energía como por medio de la condición de velocidad nula junto al contorno fijo. Este efecto viscoso es mucho más importante mientras más pequeño es el modelo de un fenómeno con superficie libre, que es operado con el criterio de similitud de Froude. Sin embargo, existe un límite del Re , denominado $Re_{crítico}$, para representar las condiciones hidrodinámicas extremas, de tal modo que si se garantiza que el Re_{modelo} es siempre mayor que $Re_{crítico}$, la formación de vórtices, el desarrollo de las zonas de separación de la corriente y los procesos difusivos de los chorros en el modelo son semejantes a los del prototipo.
- La tensión superficial (o la capilaridad) tiene un efecto muy secundario en el movimiento del agua en la naturaleza. En el caso del flujo sobre un vertedero de pared plana delgada, se reconoce que para cargas del vertedero superiores a 3 cm, la influencia de la tensión superficial en la curvatura de las superficies libres es despreciable. El efecto relativo de la tensión superficial (We) se presenta normalmente combinado con el efecto de la viscosidad (Re), de tal modo que se deja de considerar la influencia de la tensión superficial cuando el producto $Re^{0.2} We^{0.6}$ es mayor a 900 (Castro, 1983).
- El número de cavitación puede ser eliminado de la relación funcional (1) cuando se garantiza que la distribución de la presión sobre la pared de la estructura no puede alcanzar un valor negativo cercano a la presión de vapor.
- La definición de una estructura de control se fundamenta en el hecho de que para este tipo de estructuras existe una relación biunívoca entre la carga y el caudal, de tal modo que no se puede variar la carga sin que inmediatamente se modifique el caudal. En las estructuras hidráulicas de control, entonces, los coeficientes de descarga C_q y el de fuerza C_f son formas de expresar el número de Froude.
- Las condiciones del flujo de aproximación que se consideran en el análisis para definir la similitud dinámica restringida son: el grado de turbulencia, que caracteriza el comportamiento de las superficies de separación de la corriente desde el contorno sólido; el perfil de la distribución de velocidades, que es dependiente de las condiciones del flujo en el canal de aproximación; el efecto de la relación ancho/altura del flujo de acercamiento, que garantiza la bidimensionalidad de las relaciones experimentales y la ausencia de vórtices de eje vertical y de eje horizontal, y la no uniformidad de la distribución de velocidades, expresada por el valor del coeficiente de Coriolis α .
- Las características geométricas de detalle de la instalación en el prototipo, tales como la forma y las dimensiones de las ranuras laterales, la configuración de los cantos en la zona de aguas abajo de la estructura, la rugosidad de sus paredes, etcétera, deben estar representadas correctamente por medio del cumplimiento de la similitud geométrica.

Con las consideraciones anteriores, la relación funcional (ecuación 1) puede ser escrita de la siguiente forma:

$$(C_q)_a, (C_q)_b = F_{1,2} \left[\frac{h}{Y_0}, \frac{s}{Y_0}, \frac{Y_u}{Y_0}, \text{geometría} \right] \quad (2)$$

Para la determinación experimental de esta relación funcional general se toma en cuenta a posteriori que a través del valor q_a como variable independiente se pueden llegar a considerar todos los parámetros que inciden sobre el flujo superior, y a través del valor q_b se pueden incluir en el análisis todos los parámetros que inciden sobre el flujo inferior.

Si se asume que el flujo de aproximación en el canal rectangular tiene una distribución uniforme de velocidades se puede escribir:

$$\frac{q_b}{q_a} = \frac{Y_0 - (W_a + h)}{W_a + h} = \frac{Y_0/h}{W_a/h + 1} - 1 \quad (3)$$

o en la forma:

$$\frac{h}{W_a} = \frac{1}{\left(\frac{Y_0/h}{q_b/q_a + 1} - 1 \right)}$$

En las expresiones anteriores, dos de los tres parámetros adimensionales q_a/q_b , h/Y_0 , h/W_a deben considerarse variables independientes.

Como casos particulares de la relación 2 se mencionan las siguientes expresiones obtenidas en investigaciones individuales y que se han publicado en la literatura técnica especializada (Castro, 1983; Miller, 1994; Naudascher, 1987):

Flujo superior de un vertedero de pared delgada, según Rouse-Kandaswamy (1950)

$$Cq^* = \frac{q_a}{2/3\sqrt{2gH^{3/2}}} = Cq^* \left(\frac{h}{W_a}, \frac{h}{Y_0} \right)$$

Flujo superior de un vertedero móvil o clapeta, según Castro (1983)

$$Cq^* = \frac{q_a}{2/3\sqrt{2gH^{3/2}}} = Cq^* \left(\frac{H}{L}, \frac{W_a}{L}, \frac{h}{Y_0}, \alpha_k, \frac{L}{R}, \frac{r_a}{R} \right)$$

Flujo inferior bajo una compuerta plana, con descarga en el interior de un túnel, según von Mises-Strelkoff, Rouvé (1974)

$$Cq = \frac{q_b}{s\sqrt{2gY_0}} = Cq^* \left(\frac{s}{Y_b}, \frac{s}{Y_0}, \frac{Y_u}{Y_0} \right)$$

$$Cc = Cc \left(\frac{s}{Y_b}, \frac{s}{Y_0}, \frac{Y_u}{Y_0} \right)$$

Flujo inferior bajo una compuerta con curvatura y descarga en el interior de un túnel, según Naudascher, Kobus y Rao (1964)

$$(Cq)_b = \frac{q_b}{s\sqrt{2gY_0}} = (Cq)_b \left(\frac{s}{Y_b}, \frac{s}{Y_0}, \frac{Y_u}{Y_0}, \frac{s}{d}, \frac{r_b}{d}, \vartheta \right)$$

$$Cc = Cc \left(\frac{s}{Y_b}, \frac{s}{Y_0}, \frac{Y_u}{Y_0}, \frac{s}{d}, \frac{r_b}{d}, \vartheta \right)$$

Esquema de la solución

La hipótesis más relevante se fundamenta en la posibilidad de dividir en dos partes el caudal total del flujo a través de una estructura hidráulica como la presen-

tada en la ilustración 2: el caudal superior q_a y el caudal inferior q_b . Si esta subdivisión es aceptable, de igual modo es posible que toda la información existente de los casos particulares mencionados en el numeral anterior pueda ser utilizada con propiedad.

Asimismo, se supone que en el caso de flujo permanente es posible encontrar la línea de corriente divisoria entre los dos campos de flujo y que ésta es horizontal, a una distancia muy corta, aguas arriba de la estructura. La ubicación de esta línea de corriente define una relación biunívoca entre el par de valores de los caudales q_a y q_b , y las distancias Y_0 , Y_a e Y_b . Definida esta línea de corriente de separación, es posible calcular el flujo simultáneo sobre y bajo una estructura por medio de la solución a los dos problemas parciales:

- El flujo superior sobre un vertedero de altura W_a .
- El flujo inferior bajo una compuerta con una carga Y_0 dentro de un túnel de altura Y_b .

El cálculo de los caudales parciales procede entonces bajo la aplicación de las siguientes relaciones:

$$q_a = (h + W_a)V_0 = \frac{2}{3}Cq^* \sqrt{2gH^{3/2}} \quad (4)$$

$$q_b = Y_bV_0 = Cc.s\sqrt{2g(H_0 - h_c)} \quad (5)$$

para el flujo superior y para el flujo inferior, respectivamente.

En el caso particular que se conozca la geometría de la estructura de cierre y de la configuración del cuenco de disipación de energía, que es lo más común en el proceso del dimensionamiento de una instalación cualquiera, la relación funcional entre las variables independientes como la carga h sobre el vertedor y la apertura s bajo la compuerta, y las variables dependientes como los caudales q_a y q_b , la profundidad de agua y_0 en el flujo de aproximación y la profundidad de agua y_u en el flujo aguas abajo de la vena contracta puede ser escrita, según las reglas del análisis dimensional, de la siguiente forma:

$$F\left(Fr_0, \frac{h}{Y_0}, \frac{s}{Y_0}, \frac{Y_u}{Y_0}\right) = 0$$

Esto significa que uno de los parámetros adimensionales de la función anterior puede determinarse en función del conocimiento y de los valores de los otros tres. Los diagramas de diseño obtenidos para las configuraciones reales del flujo combinado superior e inferior muestran entonces la relación funcional entre los

parámetros adimensionales, como por ejemplo en la ilustración 6.

Descripción de la instalación experimental

Los ensayos para la determinación experimental de las relaciones funcionales expuestas se realizaron en un canal de laboratorio, con longitud efectiva de 4.5 m, sección rectangular, ancho efectivo de 0.5 m y paredes de vidrio, cuya altura útil es de 0.8 m. Sobre las paredes se dispuso de dos rieles metálicos, debidamente nivelados, que sirvieron de guías para el carro soporte de la instrumentación de medida.

El caudal se deriva de un tanque elevado, donde se garantiza el nivel constante de la superficie libre del agua por medio de vertederos laterales. La aducción consta de una tubería de diámetro interior de 200 mm, que termina en el tanque de amortiguación, en donde se dispuso del tubo perforado y de pantallas de material sintético filtrante que permiten una distribución uniforme de la velocidad en la zona de inicio del tramo de prueba del canal. La transición entre el tanque de amortiguación y el canal tiene una forma de tobera, según la geometría propuesta por Rouse y Hassan (Rouse, 1981). La regulación principal del caudal se realizó por medio de una válvula de compuerta, mientras que la regulación fina se hizo en una tubería paralela de 25 mm de diámetro, por medio de una válvula de control electromecánico. El caudal máximo de circulación fue de 100 l/s y con el sistema de regulación fina se realizó el ajuste hasta por 0.1 litros por segundo.

Al final del tramo de prueba del canal de laboratorio se dispuso de un fondo falso intermedio que permite la medición de los caudales q_a y q_b por separado. Con el fin de obtener diferentes valores en la relación de los caudales q_b/q_a se dispuso de estructuras de control o de embalsamiento aguas abajo de los tanques amortiguadores, donde se miden por separado los caudales q_a y q_b .

La medición de los caudales se realiza por medio de vertedores rectangulares, normalizados, de cresta delgada, sin contracciones laterales, con una altura de la cresta igual a 30 cm. La sección de medida de la carga sobre el vertedor se realiza a una distancia de 75 cm aguas arriba del paramento, satisfaciendo las condiciones impuestas de que esta distancia sea mayor a cuatro veces la carga máxima medida y a 2.5 veces la altura del paramento vertical. En todos los vertedores se garantiza una total aireación de la superficie inferior de la lámina vertiente.

La medición del perfil de la superficie libre del agua se realiza mediante limnómetros de punta recta que tienen un nonius de precisión de 0.1 mm. Los limnóme-

tros, además, tienen incorporado un marcador óptico del contacto entre un indicador electrónico y la superficie del agua. La precisión para la ubicación de la superficie libre del agua con este tipo de limnómetro es del orden de 0.5 mm cuando está ondulada. En el caso de agua relativamente tranquila, la precisión es de 0.1 milímetro.

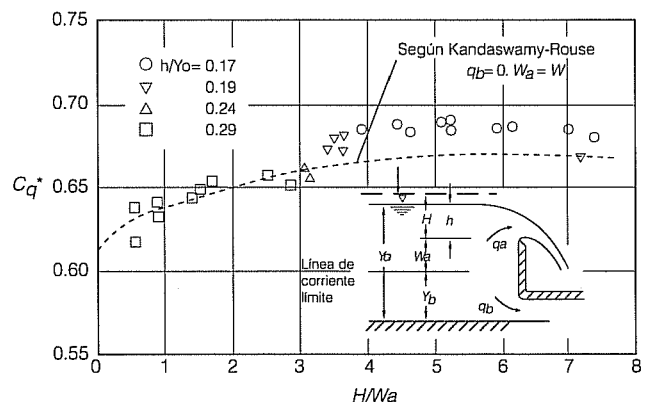
La altura de presión se registró por medio de piezómetros colocados en orificios de 1 mm de diámetro interior, conectados con tubería elástica a un tablero de medida donde la precisión es de 1 mm. Previo a cada operación del modelo se tuvo cuidado en garantizar la limpieza total y la completa extracción del aire de los orificios y del interior de los tubos de medida.

Las velocidades en el flujo de aproximación al modelo fueron medidas con una microhélice de 1.5 cm de diámetro, desarrollada por el laboratorio de Delft, especialmente para su uso en laboratorio.

Análisis de los resultados experimentales

La ilustración 3 muestra los resultados experimentales para el caso del flujo superior de un vertedero de pared delgada junto con los valores según Kandaswamy-Rouse. Para valores de $H/W_a > 3$ se observa que los resultados para el flujo combinado difieren un máximo de 5% de los valores con $q_b = 0$, es decir, con flujo superior exclusivamente. Esta diferencia porcentual es pequeña y se justifica, en primer lugar, porque la línea real de separación de los flujos no es exactamente horizontal y, por lo tanto, la definición de la distancia W_a no está libre de aspectos subjetivos y, en segundo lugar, porque no es posible la formación del vórtice estacionario de eje horizontal que normalmente está presente en la esquina entre el paramento y el fondo fijo,

Ilustración 3. Resultados experimentales obtenidos para el flujo sobre un vertedero de pared delgada con descarga inferior simultánea.



aguas arriba del vertedero de pared delgada. Este tipo de vórtices es el resultado de la presencia de los dos contornos sólidos y han sido reportados en la literatura técnica, por ejemplo por Rouse (1981). Su incidencia sobre los coeficientes de descarga se interpreta actualmente como un "efecto de escala" debido a la viscosidad dinámica del agua y por medio de la definición de un número de Reynolds particular.

La ilustración 4 indica los resultados de la variación del coeficiente de descarga para el caso del flujo superior sobre vertederos móviles, con ángulo de operación $\alpha_K = 30^\circ$. La tendencia de los valores experimentales muestra siempre una mejor eficiencia del vertido superior para el caso de flujo simultáneo. En general, los valores de los coeficientes de caudal son mayores mientras más pequeño sea el ángulo α_K de levantamiento del vertedero o clapeta, y el incremento en dichos coeficientes es muy sensible a la variación del parámetro W_g/L . En la ilustración 4, las diferencias entre los coeficientes de caudal de las dos curvas son menores al 8% y, por lo tanto, pueden ser consideradas relativamente de poca importancia para fines de diseño hidráulico, dado que están dentro del rango de precisión admisible en los instrumentos de medida del caudal, de la carga y, sobre todo, de la definición de la línea de separación de los flujos.

Frente a estas dificultades de las instalaciones experimentales, ya mencionadas en la disertación doctoral de Castro (1983), y considerando que en este tipo de flujos la simulación numérica brinda excelentes resultados para obtener los valores libres de los efectos de escala, se está desarrollando un modelo numérico sobre la base de la teoría potencial del flujo. El modelo desarrollado por Castro, con la ayuda del método

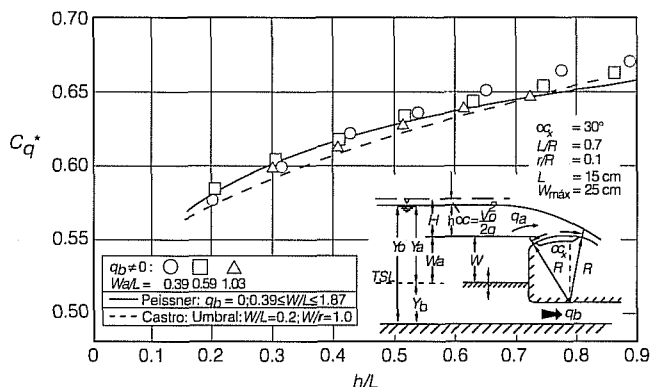
de los elementos finitos dentro de un campo integral cuyos contornos no son fijos, ha dado excelentes resultados en la determinación de las superficies libres y, por lo tanto, su aplicación al caso de flujo confinado permitirá obtener una referencia apropiada para la definición de la geometría y de la ubicación de la línea de separación de los flujos.

Para el análisis de las características del flujo bajo una compuerta, se prefiere el uso del coeficiente de contracción C_c frente al uso del coeficiente de descarga C_q , con el fin de eliminar la influencia de la profundidad de agua, aguas abajo de la compuerta, en condiciones de flujo sumergido a la salida. El valor de C_c varía muy poco con el nivel de presión externa en la superficie extrema de la sección contracta. Este coeficiente es el resultado de la carga piezométrica aguas arriba, afectada por la contracción brusca geométrica.

En el estudio experimental se han comparado los valores del C_c según Rouvé, Khader y von Mises, que son válidos para la descarga sumergida con nivel libre aguas arriba de la compuerta; los valores, según Fangmeier-Strelkoff, que son el resultado de la aplicación de la teoría potencial al flujo bruscamente acelerado bajo la compuerta y los puntos experimentales que corresponden al caso particular en el que la apertura de la compuerta es la tercera parte de la dimensión vertical del túnel. Esta comparación indica una variación muy pequeña en el valor de la contracción máxima del flujo inferior, pero su tendencia es muy clara, la contracción es mayor para el caso del flujo combinado. En este caso se interpreta también que la discrepancia se debe al efecto de vórtices de eje horizontal, que en el caso de la compuerta en el interior del túnel se presentan junto a la esquina formada por los dos contornos fijos. La ausencia de estos vórtices cuando existe flujo combinado da lugar a una curvatura y a una ubicación diferente de la línea de separación respecto de aquella provocada por la esquina de contornos sólidos.

Este efecto es mucho más importante cuando se analiza el caso del flujo inferior de compuertas de pared ancha, con labios curvos y ubicadas en el interior de un túnel o una galería. Esto en particular representaría mejor el caso del flujo combinado, porque aguas arriba de la compuerta no se tiene la presencia de superficie libre de agua. Al comparar los valores bajo las condiciones siguientes: a) de fluido ideal, no viscoso, por medio de la simulación numérica presentada por von Mises; b) de un modelo operado con aire, es decir, con una viscosidad dinámica muy baja, y c) de un modelo con agua, de viscosidad dinámica relativamente más importante que la del aire, se ha observado clara-

Ilustración 4. Coeficientes de descarga C_q^* para flujo superior e inferior simultáneo comparados con los valores experimentales de C_q^* para el vertido superior según Castro, 1983.



mente el efecto de la formación de vórtices de eje horizontal sobre los coeficientes de contracción como un resultado de la presencia de la viscosidad. En el caso del fluido ideal, no es posible distinguir la influencia del parámetro s/d , que claramente aparece con la presencia del efecto viscoso en el fluido. Por otro lado, la contracción es tanto mayor cuanto más grande sea la apertura relativa de la compuerta con respecto al ancho de la misma, lo que puede ser explicado adecuadamente con el desarrollo diferente de la capa límite a lo largo del labio de la compuerta. Adicionalmente, la contracción es apreciablemente mayor cuando se trata de agua, lo cual es resultado de la mayor viscosidad del fluido.

En el caso general del flujo simultáneo inferior y superior de una compuerta plana para ser analizado con respecto a las variaciones del coeficiente de contracción C_c , se llega a demostrar la necesidad de modificar los parámetros de referencia y aparece que la variación con respecto a la relación y_0/d es más relevante que la variación con respecto a la apertura relativa de la compuerta. Esto es significativo, dado que responde al hecho de que se puede variar independientemente la profundidad de agua Y_0 y la altura de la línea de separación Y_b , mediante variaciones en la apertura s de la compuerta.

La ilustración 5 muestra la comparación entre los valores del coeficiente de momentos, $C_m = M / (\gamma h L^2)$, para la presente investigación experimental de flujo combinado superior e inferior, y aquellos valores obtenidos en el trabajo anterior de Castro (1983) para el flujo superior sobre vertederos móviles. El momento M es el resultado del producto de la integración de la distri-

Ilustración 5. Coeficientes de momento C_M para flujo superior e inferior simultáneo comparados con los valores experimentales de C_M para el vertido superior según Castro, 1983.

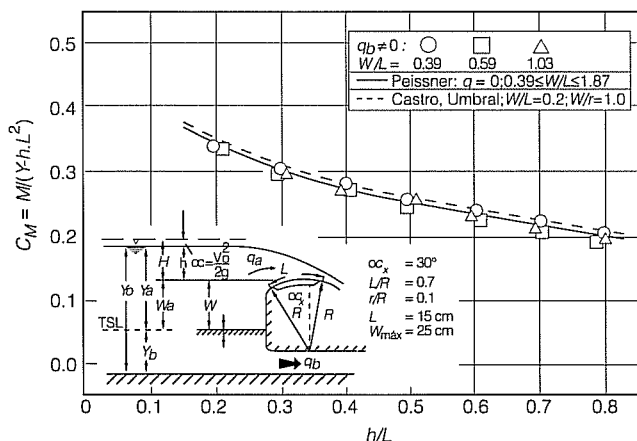
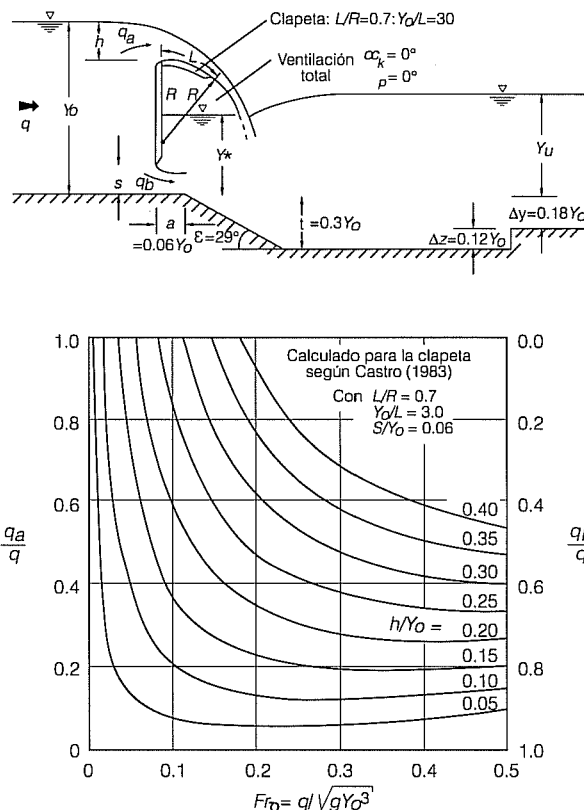


Ilustración 6. Distribución del flujo para una obra de cierre con flujo superior e inferior simultáneo.



bución de presiones sobre la estructura móvil o clapea por el brazo de giro, cuyo centro se ubica en el extremo superior de la compuerta plana.

Diagramas similares sobre la base de los resultados experimentales se reportan en Castri (1983) y Peissner (1989), en donde se ha complementado la investigación para configuraciones especiales de vertederos móviles y de cuencos de amortiguación. También se incluyen los análisis y diagramas para los coeficientes de descarga, así como los coeficientes de fuerzas dinámicas y de momentos sobre compuertas de vertido superior y de flujo inferior. La comparación entre las investigaciones justifican y convalidan el uso de la información técnica disponible para las condiciones de flujos separados en un amplio rango de operación de las estructuras y permiten su aplicación en la práctica profesional.

Conclusiones y recomendaciones

Con la ayuda de la investigación experimental se han logrado obtener criterios de diseño y de dimensionamiento de estructuras de control sujetas a flujo simultá-

neo superior e inferior. La ilustración 6 muestra un ejemplo particular de un diagrama preparado para el uso en el dimensionamiento y en la preparación de todo el plan de operación de las estructuras, sobre la base de los resultados experimentales reportados en el presente artículo.

Por otro lado, se considera que este tipo de problemas de flujo bruscamente acelerado, por efecto de cambios bruscos de la geometría del contorno sólido, puede ser simulado satisfactoriamente por medio de la teoría de flujo ideal o potencial, y con la ayuda del método de los elementos finitos, lo que permite el desarrollo de los modelos numéricos como parte de la solución rápida y barata a los problemas de flujos planos. La presentación del modelo numérico no es parte de la presente publicación.

Simbología

B	Ancho de la estructura (m).
C_q^*	Coefficiente de descarga para flujo superior e inferior simultáneo (-).
$(C_q)_a$	Coefficiente de descarga para el flujo superior del vertedor (-).
$(C_q)_b$	Coefficiente de descarga para el flujo inferior de la compuerta plana (-).
C_f	Coefficiente de fuerza para flujo superior e inferior simultáneo.
C_c	Coefficiente de contracción para el flujo inferior (-).
C_M	Coefficiente de momento para flujo superior e inferior simultáneo (-).
d	Espesor de la compuerta (m)
$F(\dots)$	Función de los parámetros (...)
F_a	Fuerza debida al flujo superior ejercida sobre la clapeta (N).
F_b	Fuerza debida al flujo inferior ejercida sobre la compuerta plana (N).
g	Aceleración de la gravedad (m^2/s).
H	$= h + (\alpha_0 V_0^2/2g)$, carga total sobre el vertedor (m).
H_0	$= h_0 + (\alpha_0 V_0^2/2g)$, altura de energía total aguas arriba de la compuerta (m).
h	Carga sobre el vertedor (m).
h_0	Altura piezométrica aguas arriba de la compuerta (m).
h_c	Altura piezométrica aguas abajo de la compuerta, en la sección contracta (m).
L	Longitud de la clapeta o vertedor móvil (m).
M	$= F_a \cdot$ brazo de giro de la clapeta. Momento de giro de la clapeta (Nm).
p_i	Presión bajo la superficie libre inferior de la lámina vertiente (N/m^2).

p_a	Presión exterior sobre la lámina vertiente (N/m^2).
q	Caudal unitario ($m^3/s.m$).
q_a	Caudal unitario del flujo superior sobre el vertedor ($m^3/s.m$).
q_b	Caudal unitario del flujo inferior bajo la compuerta plana ($m^3/s.m$).
r	$= r_a$, radio de curvatura del umbral hacia aguas arriba (m).
r_a	Radio de curvatura del extremo superior de la compuerta plana (m).
r_b	Radio de curvatura del labio inferior de la compuerta plana (m).
R	Radio de curvatura de la clapeta o vertedor móvil (m).
s	Apertura de la compuerta (m).
V_0	Velocidad media del flujo de aproximación hacia la estructura (m/s).
V_c	Velocidad media del flujo en la sección contracta (m/s).
W	Altura total de la compuerta plana vertical (m).
W_a	Altura ficticia del vertedor con flujo superior (m).
Y_0	Profundidad del flujo de aproximación hacia la estructura (m).
Y_a	Profundidad ficticia de agua para el flujo superior (m).
Y_b	Altura ficticia de agua para el flujo inferior bajo la compuerta (m).
Y_u	Profundidad de agua, aguas abajo del cuenco disipador (m).
Y_*	Profundidad de agua, inmediatamente aguas debajo de la estructura (m).
α	Ángulo de inclinación del chorro al impactar en el cuenco (-).
α_0	Coefficiente de Coriolis en el flujo de aproximación (-).
α_c	Coefficiente de Coriolis en el flujo inferior, sección contracta (-).
α_k	Ángulo de inclinación de la clapeta o vertedor móvil (-).
φ	Ángulo de inclinación de la estructura respecto de la horizontal (-).
ϑ	Ángulo de inclinación del labio inferior de la compuerta respecto de la horizontal (-).
γ	Peso específico del agua (N/m^3).
Fr_0	Número adimensional de Froude para representar el efecto gravitacional (-).
Re	Número adimensional de Reynolds para representar el efecto viscoso (-).
We	Número adimensional de Weber para representar el efecto de la tensión superficial (-).
Ka	Número adimensional de cavitación (-).

TSL Ubicación de la línea ficticia de separación entre el flujo superior e inferior.

Recibido: 11/03/1999
Aprobado: 24/01/2001

Referencias

- Castro, M.A., *Abfluß- und Auflastbeiwerte für den Entwurf von Stauklappen*, disertación, Instituto de Hidromecánica, Universidad de Karlsruhe, Alemania, 1983.
- Miller, D.S., "Discharge Characteristics", *IAHR Hydraulic Structures Design Manual*, núm. 8, Editorial Verlag A.A. Balkema, Rotterdam, 1994.
- Naudascher, E., "Hydrodynamische und hydroelastische Beanspruchung von Tiefschützen", revista *Der Stahlbau*, núm. 7 y núm. 9, Alemania, 1964.
- Naudascher, E., *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*, Editorial Springer Verlag Wien, Nueva York, 1987.
- Naudascher, E., "Hydrodynamic Forces", *IAHR Hydraulic Structures Design Manual*, núm. 3, Editorial Verlag A.A. Balkema, Rotterdam, 1991.
- Peissner, K.H., *Abfluß- und Belastungskenngrößen bei gleichzeitig über- und unterströmten Wehrverschlüssen*, disertación, Instituto de Hidromecánica, Universidad de Karlsruhe, Alemania, 1989.
- Preißler, H. y G. Bollrich, *Technische Hydromechanik-Band 1*, Editorial VEB Verlag für Bauwesen, Berlín, 1985.
- Rouse, H., *Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers*, Editorial Dover Publications, Nueva York, 1981.
- Schanz, H.W., *Experimentelle Untersuchungen der hydrodynamischen Beanspruchung von Tiefschützen*, tesis de grado de Dipl.-Ing. en el Instituto de Hidromecánica, Universidad de Karlsruhe, Alemania, 1987.

Abstract

Castro Delgado, M. & X. Hidalgo Bustamante, "Experimental Analysis of Combined Overflow and Underflow through a Vertical Plane Gate", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XVII, num. 1, pages 83-91, January-March, 2002.

The problem of combined overflow and underflow through a vertical plane gate is analyzed using an experimental approach, under the assumption that to determine the total discharge it is possible to split the flow into two parts: a) the free overflow of the gate with a fictitious height for the plane structure and b) the lower discharge with the approaching flow under pressure, located within a tunnel, and a fictitious free water level upstream. Definition of the separation line or surface between flows is one of the most important objectives of this study. To compare the experimental results, other particular experiences were considered. Laboratory research validates the proposed theoretical scheme and allows working out hydraulic design diagrams for these kind of hydraulic structures.

Key words: vertical plane gate, free overflow, underflow in a tunnel, combined flow, dimensional analysis, separation surface between flows, discharge and momentum coefficients.

Dirección institucional de los autores:

Marco Castro Delgado
Ximena Hidalgo Bustamante

Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI)
Departamento de Ciencias del Agua
Escuela Politécnica Nacional
Casilla Postal 17-12-359
Teléfono: (593) 2228 113
Fax: (593) 2563 077
Quito, Ecuador.
Correos electrónicos: mcastro@mail.epn.edu.ec y
macastro@uio.satnet.net