Ing. Francisco J. Domínguez S.

Aforo por compuerta

Es de interés práctico para el ingeniero hidráulico el aforo por medio de las simples medidas geométricas de dos alturas de agua y de la abertura de una compuerta, pero así como es sencilla la operación de tales medidas, puede dar origen a un cálculo de tanteos no difícil, en caso alguno, pero sí no muy corto.

El caso general que queremos resolver consiste en que se nos den medidas las alturas h_0, h_1 y la abertura a como el ancho del canal, que suponemos igual al de la compuerta. Sobre la medida de la altura h_0, no hay dificultad ninguna; puede en cambio, ser o muy fácil o muy difícil la de h_1, pues si se trata de una vena contraída aparente, lo que supone el resalto rechazado (fig. 2), será muy fácil la medida, pero si el resalto cubre el pie de la compuerta, formando en ese sitio un resalto incompleto, lo que significa la existencia de un torbellino o rodillo superficial R (fig. 3), que mantiene en constante agitación el agua; para determinar la altura h_1 habrá que retirarse suficientemente del plano de la compuerta y medirla donde la agitación nos permita determinar una altura constante y haya terminado el torbellino superficial.

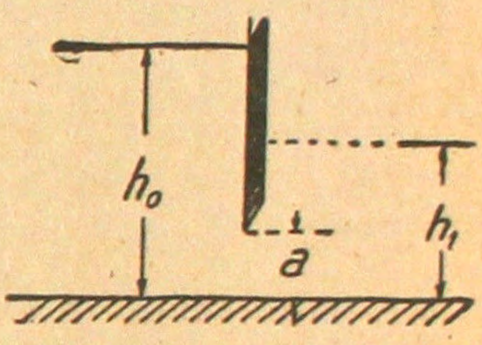

Fig. 1

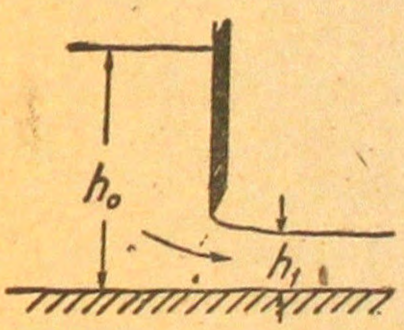

Fig. 2

Desde el punto de vista teórico nos basta, que aun en el caso de resalto rechazado, se nos dé la altura h_1 final del resalto para poder determinar el gasto que escurre por la compuerta, sin necesidad de que se nos indique que dicho resalto es rechazado, pues poseemos relaciones suficientes que nos indican dicho rechazo.

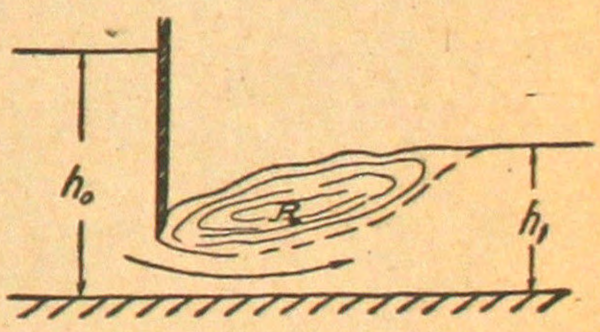

Fig. 3

Haremos a continuación la determinación del gasto por medio de dos ejemplos: uno que dé resalto rechazado y otro con la vena contraída cubierta por el resalto.

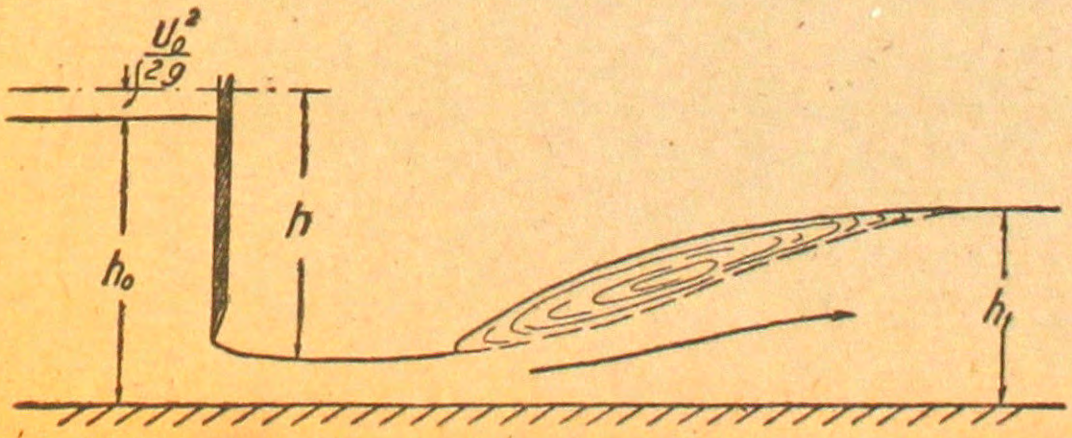

Fig. 4

El error de un aforo por compuerta, en cualquiera de ambos casos, es del orden del 1 al 2%, por efecto del error del coeficiente de gasto que se supone en los cálculos. Si agregamos el de las medidas de h_0, h_1 y a, contando con que las medidas de las alturas h_0 y h_1 pueden tener errores de ½% en más o menos, y la de *a* hasta 1%, se puede decir, en líneas generales, que el error del gasto, en las condiciones más desfavorables, puede llegar a ser de 4% y fácilmente, con operaciones prolijas, solamente poco más de la mitad de esa cifra.

1.er ejemplo:

En un canal de 3 m. de anchura de base, de forma rectangular, una compuerta de todo el ancho deja una abertura de 0,60 m. de altura. ¿Qué gasto está escurriendo por el canal si $h_0 = 3{,}10$ m. y $h_1 = 1{,}40$ m.? La profundidad h_1 se ha medido a suficiente distancia, de manera que no había torbellino que la hiciera incierta.

Suponemos primeramente que el resalto es rechazado por la vena que pasa por el orificio de la compuerta, y aceptamos que el coeficiente m vale 0,61 (1). El espesor de la vena contraída es, pues, de $0{,}6 \times 0{,}61 = 0{,}366$ y la carga calculada por la diferencia de alturas simplemente, sería de $3{,}10 - 0{,}366 = 2{,}734$ m. La carga así calculada y la vena contraída antes determinada, nos indicarían que el gasto es de

$$Q = 0{,}366 \times 3 \sqrt{2\,g \times 2{,}734} = 1{,}098 \times 7{,}32 = 8{,}037 \text{ m}^3 : \text{s}$$

Para el cálculo correcto del gasto hay que agregar la altura de velocidad inicial $\left(\frac{U_0^2}{2g}, \text{ fig. } 4\right)$, al cómputo de la carga. La velocidad inicial vale aproximadamente $\frac{8{,}04}{3 \times 3.10} = 0{,}87$ y la altura de velocidad correspondiente es de 0,038. La carga, correctamente calculada, vale entonces $2{,}734 + 0{,}038 = 2{,}772$ m. y por lo tanto el gasto sería

$$Q = 1{,}098 \sqrt{2\,g \times 2{,}772} = 8{,}10 \text{ m}^3 : \text{s}$$

Efectivamente, el resalto es rechazado, pues es fácil verificar que un torrente de 0,366, con este gasto, se conjuga en resalto con una altura mayor que 1,40 m. La altura crítica es de $h_c = 0{,}905$ m. y como la altura relativa del torrente es $\frac{0{,}366}{0{,}905} = 0{,}405$, corresponde (2) una de río $\frac{h_1}{h_c} = 2{,}03$, es decir, $h_1 = 1{,}837$, valor mayor que $h_1 = 1{,}40$ que tiene nuestro caso.

Siendo rechazado el resalto, el gasto es el calculado de 8,100 m³ : s

Es evidente que en este caso se pudieron medir $h_0 = 3{,}10$ y $h_1 = 0{,}366$, esta última en la vena contraída (3).

2.° ejemplo:

En un canal de 2 m. de anchura hay una compuerta que deja una abertura de 0,50 m.—Si la altura de aguas arriba es de $h_0 = 2{,}80$ m. y la de aguas abajo $h_1 = 1{,}93$ m., calcular el gasto que está escurriendo.

(1) F. J. Domínguez — Hidráulica, 2.a edición 1945, págs. 141 y 142.
(2) F. J. Domínguez — Hidráulica, 2.a edición 1945, pág. 346.
(3) Como el único resalto posible es el que llega a $h_1 = 1{,}40$ y viene, calculando en la forma ordinaria, de $h = 0{,}53$, profundidad que se produce a 29,5 mts. si el canal es de albañilería de piedra con pendiente de 0,002, calculado por los métodos ordinarios. El resalto, usando la fórmula $\frac{L}{h_c} = 18 - 20 \frac{h_0}{h_c}$ tiene una longitud de 8,90 mts., por lo tanto, h_1 se tiene que haber medido a 38,4 mts. del plano de la compuerta.

Si como ensayo suponemos que el resalto pueda ser rechazado, tomando m = 0,61, el espesor de la vena contraída sería de ma = 0,5×0,61 = 0,305, la carga sería h = 2,80 — 0,305 = 2,495, y por lo tanto, el gasto Q = 0,305 × 2 $\sqrt{2g \times 2{,}495}$ = 4,266 m³ : s

A este gasto corresponde una altura crítica h_c = 0,774 m. y por lo tanto el torrente de la vena contraída, cuya altura relativa es $\frac{h_0}{h_c} = \frac{0{,}305}{0{,}774} = 0{,}394$ es capaz de saltar a un río de altura relativa $\frac{h_1}{h_c} = 2{,}07$, o sea de altura h_1 = 1,575 m menor que 1,93 que hay después de la compuerta. En consecuencia, el gasto es menor de 4.266 m³ : s, y el resalto cubre el pie de la compuerta.

La determinación del gasto se hace por tanteos de la manera siguiente:

Nos damos un gasto y un coeficiente m, así obtenemos a través de la ecuación Q = m la $\sqrt{2gh}$ una carga h. Esa carga h nos determina el valor de h′ profundidad del resalto ahogado a plomo de la vena contraída. Luego verificamos este valor de h' a través de la ecuación (1):

$$X' = \sqrt{X_1^2 + \frac{2}{X_1} - \frac{2}{mA}}$$

en que X′ es la razón $\frac{h'}{h_c}$; X_1 vale $\frac{h_1}{h_c}$ y $A = \frac{a}{h_c}$, siendo el significado de las letras el mismo dado anteriormente y que reproduce la figura 5. El cuadro siguiente nos evita mayores detalles del procedimiento de tanteo, y creemos que no necesita mayores explicaciones (2). Recordemos que a = 0,5 y h_1 = 1,93 m. El cuadro se ha dividido en dos partes únicamente por su tamaño.

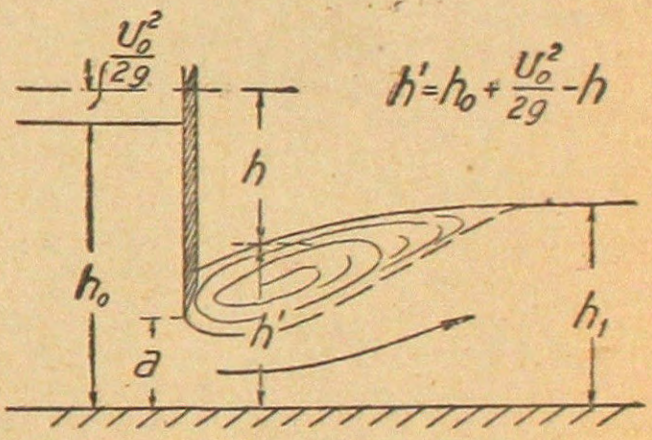

Fig. 5

Q	m	ma	$\sqrt{2gh}$	h	$\frac{U_0^2}{2g}$	$h_0+\frac{U_0^2}{2g}$	h′	h_c	A
3,50	0,61	0,305	5,74	1,68	0,02	2,82	1,14	0,679	0,734
3,00	»	»	4,92	1,235	0,014	2,814	1,579	0,613	0,816
3,10	»	»	5,082	1,319	0,015	2,815	1,496	0,626	0,799

Q	mA	X_1	X_1^2	$\frac{2}{X_1}$	$\frac{2}{mA}$	$X_1+\frac{2}{X_1}-\frac{2}{mA}$	X′	h′
3,50	0,449	2,845	8,08	0,703	4,453	4,33	2,16	1,465
3,00	0,498	3,15	9,92	0,635	4,017	6,538	2,555	1,565
3,10	0,487	3,082	9,50	0,649	4,105	6,044	2,458	1,536

(1) F. J. Domínguez—Hidráulica, 2.a edición 1945, pág. 143, ecuación 12.

(2) No detallamos, por ejemplo, que el coeficiente m supuesto en la 2.a columna del 1.er cuadro es definitivo, pues formando la razón $\frac{a}{h}$ nos resulta siempre mayor de 0,15 (véase coeficiente de Boileau, Hidráulica, pág. 141).

Interpolando gráficamente, se encuentra que el gasto que da con las dos ecuaciones el mismo h' es $Q = 3{,}02\ m^3 : s$.

En la medida de las alturas se puede cometer errores de 1 cm. en la de aguas arriba, y de unos 2 en la de aguas abajo (aquí mayor error por las ondulaciones superficiales debidas al resalto), y una unidad en el coeficiente. Si tomamos todos estos errores de manera que influyan en el mismo sentido, se podría llegar a gastos 3°/₀ mayores o menores que el indicado.

Es evidente que un umbral desnivelado en la compuerta o la arista inferior de ésta no horizontal, que se pueden verificar en cada caso, o bien, el estado de esta arista en forma de hacer incierta la pared delgada, introducen dificultades que influyen en la exactitud del gasto aforado. Se entiende que el procedimiento conviene especialmente cuando esas circunstancias no existen.

Santiago, Agosto de 1946. F. J. D. S.