

Medidores de Descarga

*Por el Prof. Ing. Rodrigo Cano
Jefe de la Sección de Hidráulica*

INTRODUCCION

En el diario uso del agua hecho por el hombre, frecuentemente es necesario medir la descarga de corrientes medianas y pequeñas. Como este es un problema muy antiguo, se han diseñado gran cantidad de aparatos para tal fin.

Se llama caudal o descarga, el volumen de agua que atraviesa una sección de la corriente por unidad de tiempo.

Llamando Q la descarga se tiene: $Q = AV$.

En donde A . es el área de la sección normal a la dirección del flujo, y V la velocidad promedio del flujo en la sección que se estudia.

El área de la sección se determina fácilmente cuando se conoce su forma geométrica. El problema básico en la determinación de la descarga, es el cálculo de la velocidad media.

Más adelante se verá cómo partiendo de principios teóricos y haciendo ciertas suposiciones que simplifiquen el problema, se deducen ecuaciones para Q . Estos valores de Q se corrigen con coeficientes determinados experimentalmente.

Desde el punto de vista de funcionamiento los medidores pueden dividirse en medidores de flujo abierto, y medidores de flujo confinado, o en tubería.

Se llama flujo abierto o flujo de canal, aquél que tiene la cara superior en contacto con la atmósfera. A lo largo de esta cara la presión es igual a la atmosférica. Ejemplo: un río, o un canal.

Se llama flujo confinado, o flujo en tubería, aquél que avanza a lo largo de un conducto cerrado y lo llena totalmente. A lo largo de la cara superior del conducto la presión es diferente de la atmosférica.

MEDIDORES DE FLUJO ABIERTO

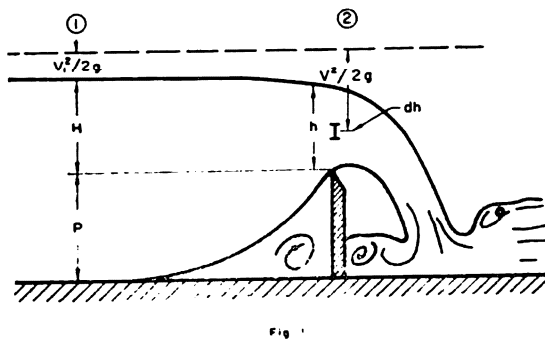
Los principales medidores de flujo abierto son: Vertederos de borde ancho, vertederos de borde agudo, azudes y canaletas de flujo crítico. Un caso intermedio entre flujo abierto y flujo confinado, lo constituyen las compuertas y los orificios.

Vertederos de Borde Agudo. Los vertederos de borde agudo o de pared delgada están formados por una placa delgada metálica o de madera. La placa tiene un orificio en su parte superior para el paso del agua; la forma geométrica del orificio, es muy

variada: rectangular, triangular, semicircular, parabólica, etc., y otras formas más complicadas se usan frecuentemente.

La placa-vertedero se coloca en el canal cuya descarga se quiere medir, y se obliga el agua a pasar por el orificio superior. La placa debe ser suficientemente delgada para que el flujo se separe de ésta, tan pronto como cruce el orificio. Para satisfacer esta condición y ser estructuralmente resistente, el perímetro del orificio, tiene sección trapezoidal con base superior de $1/8''$ a $1/16''$, base inferior el espesor de la placa, y la cara inclinada mirando aguas abajo.

VERTEDERO RECTANGULAR DE BORDE AGUDO



Supongamos un vertedero de orificio rectangular con ancho "B" igual al ancho del canal; el umbral del orificio está a una altura P sobre el fondo del canal. Hidráulicamente el flujo sobre este vertedero es un problema muy complicado porque intervienen una serie de variables, difíciles de calcular.

Cuando la corriente se acerca al vertedero, se separa del fondo dejando una zona de flujo muerto detrás de la placa. En esta zona se forma un torbellino de eje horizontal, que produce disipación de energía.

Al cruzar el vertedero el flujo tiene curvatura apreciable, lo que origina una aceleración centrífuga que afecta la distribución de presiones.

La viscosidad del agua y la tensión superficial también afectan las condiciones ideales de flujo.

Para simplificar el problema se harán las siguientes suposiciones:

1º) Las pérdidas de energía por fricción y torbellinos entre las secciones (1) y (2), son despreciables.

2º) En la sección (2) sobre el vertedero como el chorro queda libre la presión encima, debajo y dentro de éste es igual a la atmosférica.

3º) La caída de la superficie del agua entre las secciones (1) y (2) es despreciable; luego, el espesor de la vena líquida por encima del umbral del vertedero en las secciones (1) y (2) es igual. Sea H. éste valor.

4º) Los efectos de la viscosidad y la tensión superficial pueden despreciarse.

Como las suposiciones anteriores se alejan un poco de la realidad, al final se aplicará un factor de corrección (determinado experimentalmente) a la ecuación deducida teóricamente para la descarga.

Igualando la energía total entre (1) y (2) se tiene:

$$P + H + \frac{V_1^2}{2g} = P + H - h + \frac{v^2}{2g}$$

$$v = \sqrt{2g(h + V_1^2/2g)} \quad (1)$$

La descarga que cruza el vertedero es:

$$(A) \, dQ = v dA \quad (B) \, dA = B dh$$

Reemplazando (1) y (B) en (A) e integrando entre 0 y H se obtiene:

$$Q = \frac{2}{3} B \sqrt{2g} \left\{ \left(H + \frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} \right\} \quad (2)$$

Tomando un valor grande para P la velocidad en (1) será

pequeña, y $\frac{V_1^2}{2g}$ puede despreciarse. La ecuación (2) queda:

$$Q = \frac{2}{3} B \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (3)$$

Aplicando un factor de corrección C por las suposiciones hechas anteriormente, la ecuación para la descarga queda:

$$Q = \frac{2}{3} CB \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (4)$$

Rehbock obtuvo experimentalmente la siguiente ecuación para C:

$$C = 0,605 + 0,08 \frac{H}{P} + \frac{1}{1.000 H} \quad (5)$$

H y P en metros

La ecuación (5) requiere que la cara inferior de la vena líquida esté bien aireada para que la presión sea igual a la atmosférica, y que la velocidad en la sección (1) sea aproximadamente

costante de superficie a fondo.

Cuando el ancho del vertedero es igual al ancho del canal, la vena líquida impide la entrada de aire por los lados hacia su cara inferior. Como el chorro arrastra aire, se crea una disminución de presión en la parte inferior de la vena líquida. Esto hace que la vena se acerque a la pared del vertedero y aumente su curvatura. El resultado final es un aumento en la descarga, con lo cual las ecuaciones (4) y (5) pierden su valor.

Para corregir este defecto, se colocan tubos laterales de aireación que comuniquen la zona debajo del chorro libre, con la atmósfera. La distribución de velocidad en la sección (1) se uniformiza colocando rejas verticales.

Las ecuaciones deducidas anteriormente, suponen que el ancho "B" del vertedero sea igual al ancho B_1 del canal. Cuando el canal es más ancho que el vertedero, se produce una contracción lateral del chorro libre, lo cual disminuye la descarga. Se podría aplicar una corrección por contracción C_1 a la ecuación (4), pero este valor es difícil de calcular, debido a que C_1 varía con H, B, y B_1 .

De acuerdo con investigaciones de Francis, para este caso se puede usar la ecuación (4) con:

$$C = 0,623 \times \frac{B - H/5}{B} \quad (6)$$

El vertedero trapezoidal o Cippoletti, trata de compensar el efecto de contracción del chorro, con un aumento en el área.

La sección trapezoidal del vertedero tiene ancho de base B y pendiente de los lados, uno horizontal por cuatro vertical.

Para este vertedero se puede usar la ecuación (4) con B la base del trapecio y C de la ecuación (5).

VERTEDERO TRIANGULAR DE BORDE AGUDO

Cuando las descargas a medir son muy pequeñas, el espesor de la vena líquida en un vertedero rectangular se hace muy pequeño, con lo cual la viscosidad y la tensión superficial vienen a ser fuerzas importantes, y las ecuaciones (4) y (5) dan solo resultados aproximados.

En estos casos es más recomendable usar vertederos de sección triangular.

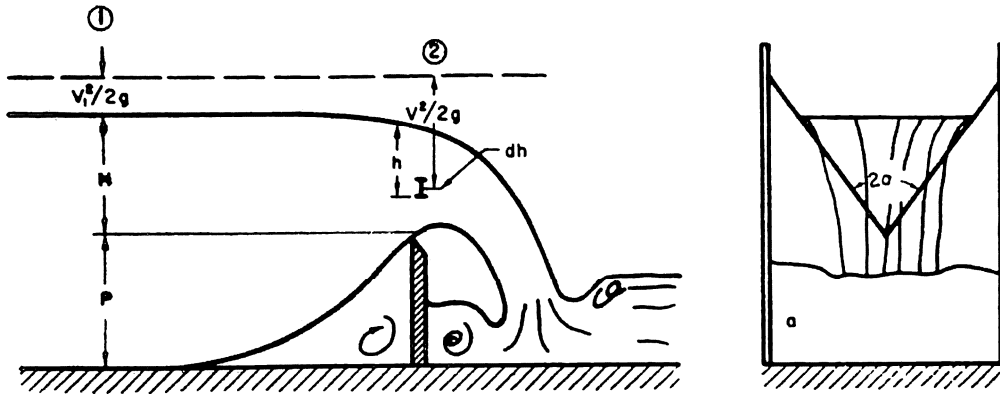


Fig. 2

La descarga que cruza el vertedero es:

$$dQ = v dA \quad (7) \quad dA = 2 (H - h) \operatorname{tg} \alpha \, dh \quad (8)$$

Reemplazando (1) y (8) en (7) e integrando, se tiene:

$$Q = \frac{8}{15} \operatorname{tg} \alpha \sqrt{2g} N$$

$$N = \left\{ (H + V_1^2/2g)^{5/2} - (V_1^2/2g)^{3/2} (5H/2 + V_1^2/2g) \right\} \quad (9)$$

Si se desprecia la energía cinética en (1) $\frac{V_1^2}{2g}$, y teniendo

en cuenta los efectos de contracción del chorro libre, viscosidad y tensión superficial del agua, la ecuación (9) queda:

$$Q = C \frac{8}{15} \operatorname{tg} \alpha \sqrt{2g} H^{5/2} \quad (10)$$

C de la ecuación (10) es un factor que trata de corregir los efectos antes mencionados. Para $2\alpha = 90^\circ$, experimentalmente se ha encontrado que C varía aproximadamente entre 0,580 y 0,600.

De acuerdo con experimentaciones de V. M. Cone, si se cambia el exponente 2,5 de H, en la ecuación (10) por 2,48, C toma un valor constante 0,583 para $2\alpha = 90^\circ$. Para la ecuación (10) con $2\alpha = 90^\circ$, A. T. Lenz, sugiere:

$$C = 0,560 + \frac{0,700}{R^{0,185} W^{0,170}} \quad (11)$$

Donde R. y W son los números de Reynold y Weber:

$$R = \frac{H\sqrt{gH}}{v} \quad \text{y} \quad W = \frac{dgH^2}{t}$$

d = densidad (masa por unidad de volumen) del líquido.

t = tensión superficial del líquido.

v = viscosidad del líquido (cinemática).

La ecuación (11) se obtuvo con experimentación en muchos líquidos diferentes, luego el vertedero triangular se puede usar como mediador de descarga para cualquier líquido, usando las ecuaciones (10) y (11).

OTRAS FORMAS DE VERTEDERO CON BORDE AGUDO

Se han experimentado muchas formas de vertedero con borde agudo. Si comparamos las ecuaciones (4) y (10), vemos que todas ellas obedecen a la ecuación general:

$$Q = KH^n \quad (12)$$

En donde K y n son constantes que dependen de la forma geométrica del vertedero, la contracción del chorro libre y las propiedades físicas del líquido. n varía desde 2,5 para el vertedero triangular, hasta 1.0 para el Sutró.

El vertedero Sutró o vertedero proporcional, tiene una forma tal, que la descarga es directamente proporcional al espesor de la capa de agua H.

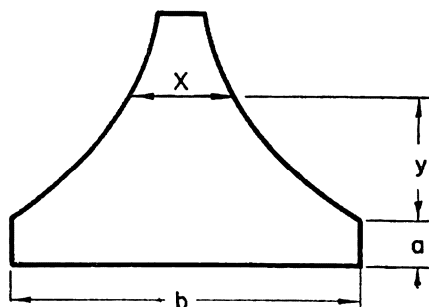


Fig 3

La forma de la sección es:

$$\frac{X}{b} = 1 - (2/\pi) \cdot \text{tg}^{-1} \sqrt{y/a} \quad (13)$$

Y la descarga:

$$Q = K (H - a/3) \quad (14)$$

$$K = Ca^{1/2} b \sqrt{2g} \quad (15)$$

C varía con H y b, entre 0.603 y 0.625 con un valor medido de 0.613.

Cuando el nivel del agua adelante del vertedero es igual o mayor que el nivel de su umbral, el chorro no cae libremente y las condiciones de flujo a través del vertedero se alteran.

En estas condiciones se dice que el vertedero está sumergido.

Experimentaciones hechas por James R. Villemonte para todos los vertederos estudiados anteriormente, dan:

$$Q = Q_1 (1 - S^n)^{0.485} \quad (16)$$

En donde:

Q = descarga real.

Q_1 = descarga del vertedero libre para el mismo valor de H .

S = grado de sumergencia, igual a la relación del nivel del agua después y antes del vertedero, medida con relación al umbral. $S < 1$.

n = exponente de H en la ecuación de descarga 1,5 para vertedero rectangular, y 2,5 para triangular.

CALIBRACION DE VERTEDEROS

Cuando un vertedero de borde agudo se construye con todos los requisitos discutidos anteriormente, se pueden usar las ecuaciones correspondientes antes vistas. En este caso como C varía con H , y las ecuaciones no presentan una solución rápida y sencilla, es recomendable suponer una serie de valores de H , y calcular las descargas correspondientes. Con estos resultados se dibuja una curva de H vs. Q . Esta se conoce con el nombre de curva de calibración del vertedero.

Una vez construída la curva de calibración, es muy fácil obtener la descarga para cualquier valor de H . Se acostumbra dibujar H en las ordenadas y Q en las abscisas. La curva de calibración puede dibujarse en papel con escalas aritméticas, sin embargo como $Q = KH^n$ (12), $\ln Q = \ln K + n \ln H$ (12¹), la ecuación (12¹) representa una línea recta.

Si se utiliza papel con escalas logarítmicas, la curva de calibración será una línea recta, y se puede construir con unos pocos puntos (mínimo dos).

Cuando el vertedero no se ajusta a los requisitos expuestos anteriormente, o se requiere alta precisión en las medidas de descarga, debe efectuarse una calibración directa.

Para la calibración directa debe usarse como guía, un medidor previamente calibrado, o un tanque de volumen conocido. En el primer caso para varias descargas, se mide Q con el medidor patrón y H en el vertedero; estos valores se dibujan en papel logarítmico y se obtiene la recta de calibración cuya pendiente es "n". En el segundo caso para varias descargas, se mide: H en el vertedero, t un tiempo arbitrario con un cronómetro, y V el incremento del volumen de agua en el tanque durante el intervalo t .

V

Se calcula $Q = \frac{V}{t}$, y se dibuja Q vs. H como en el primer caso.

La calibración directa, corrige todas las aproximaciones debidas a contracción del chorro, forma geométrica del vertedero, curvatura apreciable del flujo, velocidad de aproximación, propiedades físicas del líquido. Esa corrección queda involucrada en una pequeña desviación de "n" (el exponente de H), con respecto al valor teórico, en esta forma K de la ecuación (12) toma un valor constante. n es la pendiente de la recta de calibración.

En el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad Nacional de Minas de Medellín, se obtuvo $n=1.44$ para un vertedero rectangular de $B=20$ cms., colocado en un canal de $B_1=80$ cms. en este caso el n teórico es 1.50.

VERTEDERO DE BORDE ANCHO

Cuando la pared que forma el umbral del vertedero tiene un espesor apreciable, la vena de agua que cruza el vertedero descansa sobre el umbral, y las condiciones de flujo son diferentes al caso del vertedero de borde agudo.

Las diferencias más importantes entre el flujo a través de los dos vertederos son:

1º) El flujo a través del vertedero de Borde Agudo tiene curvatura apreciable, con concavidad hacia abajo. En el vertedero de borde ancho, el flujo es aproximadamente horizontal y paralelo.

2º) En el vertedero de Borde Agudo, la presión en la cara inferior de la vena de agua es igual a la atmósfera. En el de Borde Ancho, la presión en la misma cara es igual a la hidrostática correspondiente al peso del agua que esté por encima de ella.

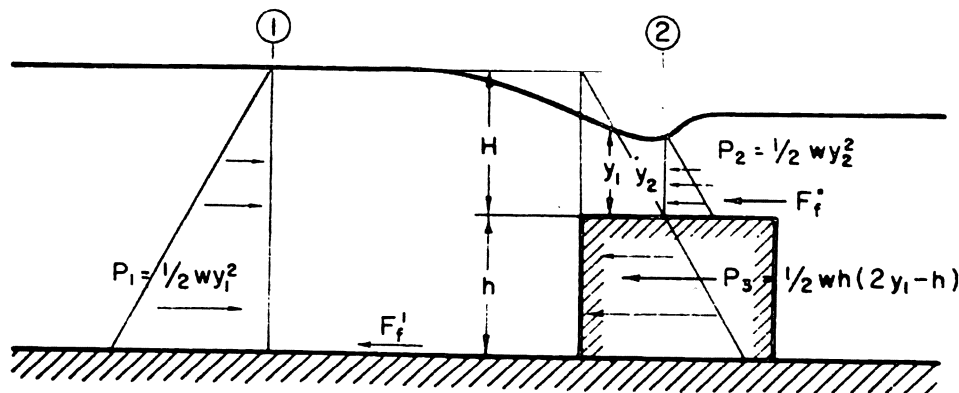


Fig 4

La fig. 4 muestra las condiciones de flujo sobre un vertedero de borde Ancho.

Muchos autores suponen que la profundidad mínima sobre el vertedero es igual a la profundidad crítica, sin embargo experi-

mentalmente se ha encontrado que esta profundidad mínima y_2 es menor que la crítica y_c . Experimentos hechos por Doeringsfeld y Barker, dieron como resultado en promedio $H = 2y_2$. Aplicando el principio de conservación de Momentum a la fig. 4, se tiene:

$$\frac{qw}{g} \left(\frac{q}{y_2} - \frac{q}{y_1} \right) = P_1 - P_2 - P_3 - F_r^1 - F_r^{11} \quad (17)$$

En donde:

q = descarga por unidad de ancho del vertedero.

w = peso específico del agua.

g = aceleración de la gravedad.

$$P_1 = \frac{1}{2}wy_1^2 \quad (18) \quad P_2 = \frac{1}{2}wy_2^2 \quad (19)$$

$$P_3 = \frac{1}{2}wh(2y_2 - h) \quad (20)$$

La fricción a lo largo del fondo del canal y sobre el umbral entre (1) y (2) (F_r^1 y F_r^{11}) puede despreciarse por ser pequeña.

Reemplazando (18), (19) y (20) en (17) se obtiene:

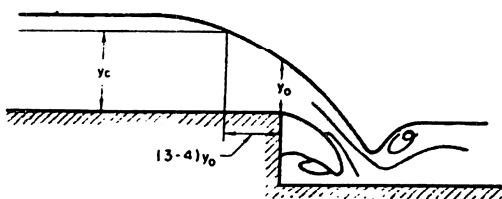
$$q = \frac{\sqrt{3}}{4} \times \sqrt{2g} \left(\frac{y_1}{y_1 + h} \right)^{1/2} H^{3/2} \quad (21)$$

La ecuación (21) es igual a la ecuación (4) con

$$C = \frac{3\sqrt{3}}{8} \left(\frac{y_1}{y_1 + h} \right)^{1/2} \quad (22)$$

Para calcular la descarga en vertederos de Borde Ancho sin contracción lateral, puede usarse la ecuación (4) con C de la ecuación (22). Sin embargo como en la deducción de las ecuaciones anteriores se despreciaron las fuerzas de fricción, es muy recomendable calcular "C" a partir de una calibración directa de vertedero.

VERTEDERO DE CAIDA LIBRE



Cuando un canal horizontal o de pendiente muy baja tiene una escala, se produce una caída hidráulica, como se aprecia en la fig. 5. Teóricamente la energía del flujo sobre la escala debe ser un mínimo, y la profundidad igual a la crítica. Sin embargo debido

a la curvatura del flujo en esta zona, la energía del flujo sí es mínima, pero la profundidad y_0 es menor que y_c .

Hunter Rouse encontró experimentalmente, que para canales horizontales o de pendiente muy baja, la profundidad crítica y_c es aproximadamente igual a $1,4 y_0$ la profundidad sobre la escala, y se forma a una distancia aguas arriba, entre tres y cuatro veces y_0 .

Un canal rectangular de pendiente horizontal o muy baja puede utilizarse como medidor de descarga, construyéndole una escala. La cara inferior de la vena de agua, debe estar suficientemente ventilada. En la sección crítica:

$$V_c = \sqrt{gy_c} \quad Q = By_c V_c \quad Q = B \sqrt{g} y_c^{3/2}$$

pero $y_c = 1,4 y_0$, reemplazando se tiene:

$$Q = 1,656B \sqrt{g} y_0^{3/2} \quad (23)$$

Con la ecuación (23) se puede construir una curva de Q vrs. y_0 , que nos permite conocer la descarga para un valor cualquiera de y_0 .

ORIFICIOS Y BOQUILLAS

Los orificios y boquillas pueden usarse como medidores de descarga. Para ello, deben conocerse las propiedades geométricas del orificio y las propiedades dinámicas del flujo.

Los orificios más comunes son el rectangular y el circular. El orificio rectangular origina un campo de flujo bidimensional.

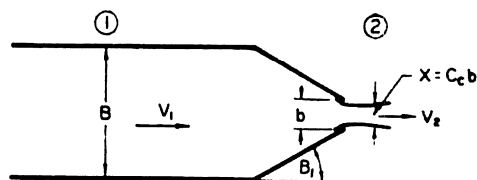


Fig. 6

La fig. 6 muestra una boquilla rectangular de ancho normal al dibujo, L . El chorro al cruzar el orificio de salida se contrae, debido al cambio de dirección de las líneas de flujo que avanzan a lo largo de las paredes de la boquilla.

Llamando C_c el coeficiente que indica la contracción del chorro se tiene: $A_c = C_c A_0$ en donde:

$A_0 =$ área del orificio, $A_c =$ área del chorro.

$A_0 = bL$ $A_c = XL \therefore$

$XL = C_c bL \therefore X = C_c b.$

El espesor del chorro en la zona contraída es $C_c b$.

El coeficiente de contracción C_c varía con la relación $\frac{b}{B}$ y con B

el ángulo B_1 .

La tabla N° 1 muestra los valores de C_c obtenidos experimentalmente por Von Mises.

TABLA N° I

b — B	B = 45° C _c	B = 90° C _c	B = 135° C _c	B = 180° C _c
0.0	0.746	0.611	0.537	0.500
0.1	0.747	0.612	0.546	0.513
0.2	0.747	0.616	0.555	0.528
0.3	0.748	0.622	0.566	0.544
0.4	0.749	0.631	0.580	0.564
0.5	0.752	0.644	0.599	0.586
0.6	0.758	0.662	0.620	0.613
0.7	0.768	0.687	0.652	0.646
0.8	0.789	0.722	0.698	0.691
0.9	0.829	0.781	0.761	0.760
1.0	1.000	1.000	1.000	1.000

Igualando la energía entre (1) y (2) de la fig. 6, se tiene:

$$\frac{P_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g}$$

La presión en (2) es igual a la atmosférica $P_2 = 0$.

Por continuidad: $BLV_1 = C_c bLV_2 \therefore V_1 = C_c bV_2/B$.

Y reemplazando este valor de V_1 en la ecuación de la energía, se tiene:

$$V_2 = \frac{\sqrt{2P_1/d}}{\sqrt{1 - C_c^2(b/B)^2}} \quad (24)$$

d = densidad del agua.

La descarga a través del orificio es:

$$Q = \frac{C_c}{\sqrt{1 - C_c^2(b/B)^2}} bL\sqrt{P_1/d} \quad (25)$$

$$Q = CdbL \sqrt{2P_1/d}$$

C_d = coeficiente de descarga.

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 - C_c^2 (b/B)^2}} \quad (27)$$

Los coeficientes de contracción descarga C_c y C_d dependen de las propiedades geométricas B_1 y $\frac{b}{B}$ del orificio.

Para orificios circulares pueden usarse los mismos coeficientes de contracción C_c de la tabla N° 1, cambiando b/B por d/D en donde d_1 y D son los diámetros del orificio y el conducto respectivamente.

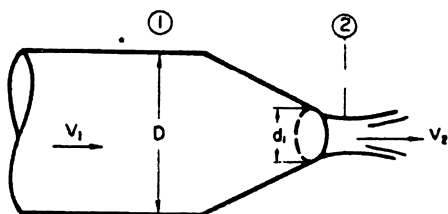


Fig 7

El campo de flujo originado por un orificio circular es tridimensional, pero puede analizarse en forma similar al campo bidimensional de los orificios rectangulares.

Nuevamente la ecuación de la energía dá:

$$\frac{P_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{y} \quad P_2 = 0$$

La ecuación de continuidad entre (1) y (2) dá:

$$Q = A_1 V_1 = A_c V_2 = C_c A_o V_2.$$

$$\frac{\pi}{4} D^2 V_1 = C_c \frac{\pi}{4} d_1^2 V_2 \quad V_1 = C_c V_2 (d_1/D)^2$$

Reemplazando V_1 en la ecuación de la energía se obtiene:

$$V_2 = \frac{\sqrt{2P_1/d}}{C_c \sqrt{1 - C_c^2 (d_1/D)^4}} \quad (28)$$

$$Q = C_c A_o V_2 = \frac{C_c \pi d_1^2}{4 \sqrt{1 - C_c^2 (d_1/D)^4}} \times \frac{\pi d_1^2}{4} \times \sqrt{2P_1/d} \quad (29)$$

$$Q = C_d \pi d_1^2 \sqrt{2P_1/d} / 4$$

C_d = coeficiente de descarga para orificio circular

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 - C_c^2 (d_1/D)^4}} \quad (31)$$

Un tanque con un orificio en el fondo, o en la parte inferior

de una de las paredes, puede utilizarse como medidor de descarga. Si el tanque es grande con relación al orificio $\left(\frac{d_1}{D}, \text{ ó } \frac{b}{B} \right) = 0$

para estos orificios $B_1 = 90^\circ$.

De la tabla 1, se obtiene: $C_c = 0.611$.

Si llamamos "h" la diferencia de nivel entre el centro del orificio y la superficie del agua, se obtiene: $P_1 = wh$.

Reemplazando los valores anteriores de P_1 y C_d en las ecuaciones (26) y (30), se obtienen las ecuaciones de descarga para orificio rectangular en la pared de un tanque:

$$Q = 0,611 bL \sqrt{2gh} \quad (32)$$

Y para orificio circular:

$$Q = 0,480 d^2 \sqrt{2gh} \quad (33)$$

MEDIDORES DE FLUJO CONFINADO

Los medidores de flujo confinado se instalan en las tuberías por donde pasa el agua, y generalmente tienen sección circular en la dirección normal al flujo. Los más comunes son: el Medidor Venturi, los orificios y las boquillas.

Medidor Venturi

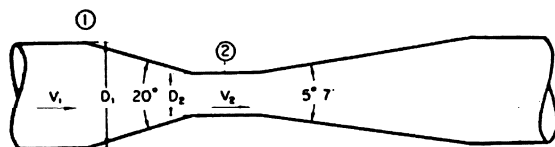


Fig. 8

Cuando se disminuye la sección de un conducto, el flujo se acelera y el incremento de velocidad produce reducción en la presión. Esta propiedad es utilizada por el Medidor Venturi, las boquillas y los orificios.

El Medidor Venturi Fig. 8, está compuesto por un tronco de cono de entrada con un ángulo de 20° , un cuerpo cilíndrico central y un tronco de cono de salida, con un ángulo entre 5° y 7° .

El cono difusor debe tener un ángulo pequeño ($5^\circ - 7^\circ$), para evitar la separación del flujo, lo que ocasionaría grandes pérdidas de energía y fluctuación en las presiones.

Experimentalmente se ha encontrado que los medidores con

$\frac{D_2}{D_1} = \frac{1}{2}$ dan condiciones muy satisfactorias de trabajo. Con

esta relación: $V_2 = 4V_1$, la altura de velocidad en (2)

$$\frac{V_2^2}{2g} = 16 \frac{V_1^2}{2g} \text{ y la disminución en presión de (1) a (2) será}$$

igual a 15 veces la altura de velocidad en (1) $\frac{V_1^2}{2g}$.

Igualando la energía entre (1) y (2) de la fig. 8 se tiene:

$$Z_1 + \frac{P_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (34)$$

La descarga Q es:

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (35)$$

Resolviendo simultáneamente las ecuaciones (34) y (35) se obtiene:

$$Q = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2g(P_1/w + Z_1 - P_2/w - Z_2)} \quad (36)$$

Sin embargo, la descarga real correspondiente a una disminución en presión dada, es menor que la calculada con la ecuación (36), porque en la ecuación (34) se ignoraron las pérdidas de energía por fricción entre (1) y (2). La ecuación (36) se corrige multiplicándola por un coeficiente C_v y se obtiene:

$$Q = \frac{C_v A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{(2g(P_1/w + Z_1 - P_2/w - Z_2))} \quad (37)$$

C_v varía con el diámetro del tubo, y con el número de Reynold, en la garganta del medidor. Para un medidor dado y un número de Reynold mayor de 10^5 C_v toma un valor aproximadamente constante. Para un medidor con reducción de 200" a 100" en el límite $C_v = 0.992$ para 4" a 2": $C_v = 0.980$ y para 1/2" a 1/4": $C_v = 0.968$.

$$\text{Para medidores con } \frac{D_2}{D_1} = 1/2:$$

$$\frac{C_v}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} = 1$$

y la ecuación (37) dá:

$$Q = A_2 \sqrt{2g(P_1/w + Z_1 - P_2/w - Z_2)} \quad (38)$$

La aproximación anterior equivale a hacer $C_v = 0.970$.

Siempre que sea posible, el medidor debe calibrarse directamente, como se indicó para los vertederos.

La diferencia de alturas piezométricas se mide generalmente con un manómetro diferencial con mercurio.

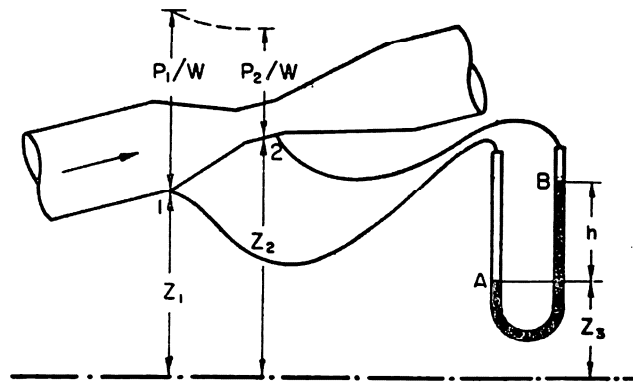


Fig. 9

La fig. 9 indica esquemáticamente la instalación del manómetro diferencial. En la manguera 1-A que tiene agua en reposo las alturas piezométricas en 1 y A son iguales.

$$\frac{P_1}{w} + Z_1 = \frac{P_A}{w} + Z_3 \quad (39)$$

En la manguera 2-B:

$$\frac{P_2}{w} + Z_2 = \frac{P_B}{w} + Z_3 + h \quad (40)$$

En la manguera A-B:

$$\frac{P_A}{W_m} + Z_3 = \frac{P_B}{W_m} + Z_3 + h \quad (41)$$

Resolviendo simultáneamente (39), (40) y (41) se obtiene:

$$(P_1/w + Z_1) - (P_2/w + Z_2) = (W_m/w - 1)h = 12,55h \quad (42)$$

w = peso específico del agua.

W_m = peso específico del mercurio.

La ecuación (42) dá la diferencia de alturas piezométricas que se requieren para el uso de las ecuaciones (37) y (38), reemplazando en éstas se obtiene:

$$Q = \frac{3,54C_v A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2gh} \quad (43)$$

$$Q = 3,54 A_2 \sqrt{2gh} \quad (44)$$

El coeficiente C_v de la ecuación (37) equilibra las pérdidas por fricción entre (1) y (2) h_{f1-2} . Corrigiendo la ecuación (34) por pérdidas por fricción y resolviendo simultáneamente con la ecuación (37) se obtiene:

$$h_{f1-2} = \left(\frac{1}{C_v^2} - 1 \right) (1 - (A_2/A_1)^2) \frac{2g}{V_2^2} \quad (45)$$

Al diseñar un medidor Venturi, deben calcularse las pérdidas por fricción con la ecuación (45) para la descarga máxima que deba medir el aparato. Estas pérdidas no deben ser muy grandes porque podrían perjudicar la operación del sistema en el cual está instalado el medidor.

En los medidores Venturi, debido al gran aumento de velocidad en la zona central, la presión P_2 se reduce considerablemente, y para grandes descargas se puede producir cavitación en el cilindro central. Cuando esto ocurre, P_2 toma un valor constante igual a P_v ; la presión de vapor del agua a la temperatura de operación, y el medidor da valores errados para la descarga.

BOQUILLAS

Las boquillas o gargantas se utilizan con muchos propósitos, uno de ellos puede ser, como medidores de descarga.

Las boquillas pueden tener forma cónica y descargar libremente, en este caso se analizan como vimos anteriormente, en el flujo abierto.

Algunas veces la boquilla está instalada dentro de la tubería, y descarga en ésta. Para estos casos se usan formas geométricamente más complejas, que la cónica. A continuación trataremos de dos de las más comunes.

La fig. 10 muestra la forma y dimensiones de una boquilla. La transición de entrada está generada por un cuadrante de elipse que gira alrededor del eje del tubo, como se indica en la fig. 10, la parte central es un cilindro de longitud $0.6 d_2$. No tiene difusor.

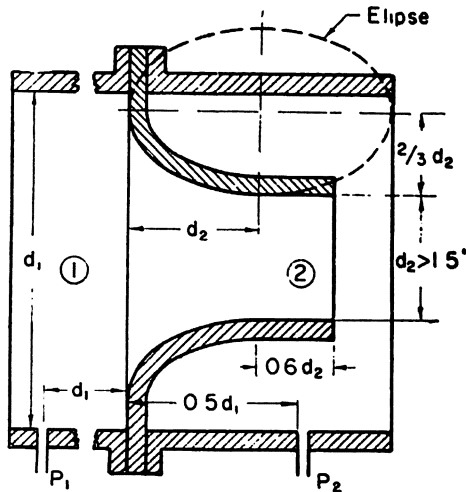


Fig. 10

La falta de difusor genera unos remolinos a la salida del chorro, que disipan gran cantidad de energía. La presión a través de estos remolinos es aproximadamente constante, por esta razón el piezómetro que mide P_2 se coloca en la pared del tubo y no en la boquilla, lo que simplifica su operación. La pequeña variación de P_2 medida en esta forma, queda involucrada en el coeficiente C_v de la ecuación (37). Esta se usa para medir la descarga en las boquillas, con el valor correspondiente de C_v .

Para este tipo de boquilla C_v varía con el número de Reynold en la garganta, y con la relación d_2/d_1 . Para números de Reynold mayores de 10^6 : $C_v = 0.994$. para $d_2/d_1 = 0.2$, $C_v = 0.993$ para $d_2/d_1 = 0.4$ $C_v = 0.992$. para $d_2/d_1 = 0.6$ y $C_v = 0.988$ para $d_2/d_1 = 0.08$.

Los orificios y las boquillas producen grandes pérdidas de energía, pero como son muy simples y baratos, se utilizan en casos donde éstas no son importantes.

La fig. 11 indica otro tipo de boquilla muy usado, y sus dimensiones.

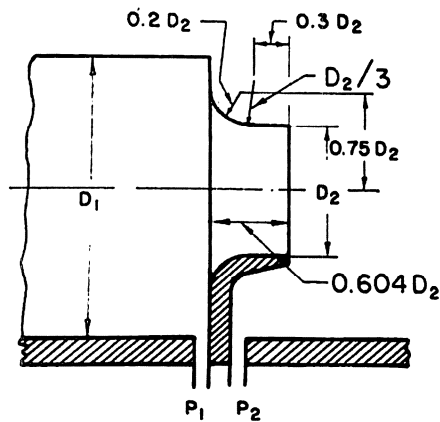


Fig. 11

Los orificios y las boquillas producen grandes pérdidas de energía, pero como son muy simples y baratos, se utilizan en casos donde éstas no son importantes.

El radical $\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}$ de la ecuación (37) es un valor muy cercano a la unidad y constante para una boquilla dada, con base en lo anterior la ecuación de descarga para la boquilla de la fig. 11 es:

$$Q = C_d A_2 \sqrt{2g(P_1/w + Z_1 - P_2/w - Z_2)} \quad (46)$$

C_d varía como en las demás boquillas y para números de Reynold en la garganta, mayores de 10^5 toma los siguientes valores constantes:

$$\frac{A_1}{A_2} = 0.5, \quad 0.4, \quad 0.3, \quad 0.2, \quad 0.1.$$

$$C_d = 1.080, \quad 1.040, \quad 1.015, \quad 1.000, \quad 0.988.$$

ORIFICIOS

Una placa con un orificio circular colocado en su centro, puede utilizarse como medidor de descarga. La placa de forma circular se coloca aprisionada entre dos bridas de la tubería, como se indica en la fig. 12.

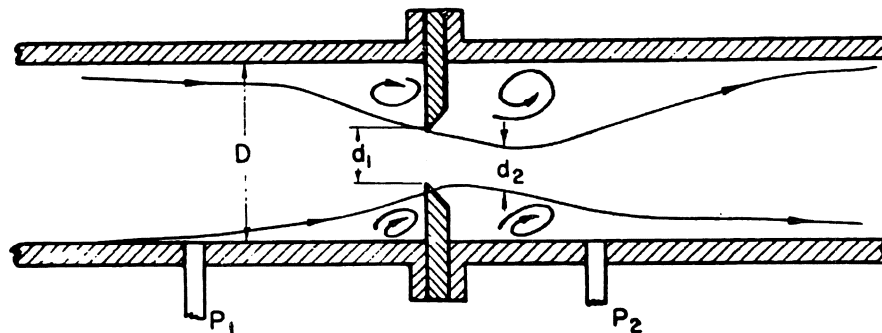


Fig 12

La presión P_2 se mide en la misma forma que en las boquillas. La descarga puede calcularse con la ecuación (46). Pero C_d

varía con el número de Reynold $R = \frac{4Q}{\pi d_1 v}$, con la relación d_1/D

y con el diámetro de la tubería D . Como en las boquillas y el Venturi, para $R > 10^6$, C_d toma valores constantes, pero a medida que disminuye R , C_d aumenta apreciablemente hasta un valor máximo, y luego disminuye.

Para utilizar un orificio de este tipo como medidor, es recomendable calibrarlo directamente. Para un cálculo preliminar pueden usarse los siguientes valores de C_d , si $R > 10^6$.

$$d_1/D = 0.7, \quad 0.6, \quad 0.5, \quad 0.4, \quad 0.3.$$

$$C_d = 0.70, \quad 0.65, \quad 0.62, \quad 0.61, \quad 0.60.$$

Los medidores Venturi, las boquillas y los orificios para ope-

rar satisfactoriamente requieren que el flujo sea estable. Los codos e irregularidades de las tuberías crean flujo espiral inestable.

Por esta razón estos medidores deben estar precedidos por un tramo de tubería recta de 30 a 50 diámetros. Cuando esto no es posible se instalan dentro del tubo y antes del medidor, dos platinas rectangulares de ancho igual al diámetro de la tubería y largo aproximadamente dos diámetros. Las platinas quedan paralelas al eje del tubo perpendiculares entre sí (dividiendo la sección circular en cuatro cuadrantes iguales).

MEDIDOR DE CODO

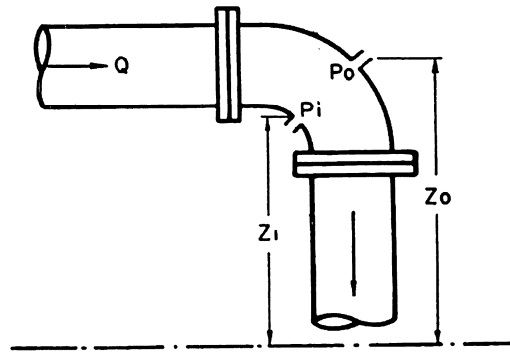


Fig 13

Un codo debidamente calibrado puede usarse como medidor de descarga. El flujo en la zona interior del codo sufre un gran aumento en la velocidad y la correspondiente disminución en presión. Conocida la diferencia de altura piezométrica entre el interior y el exterior del codo, puede calcularse la descarga en el tubo.

W. M. Lansford experimentó con gran variedad de codos de 90°, y encontró que siempre se cumple la ecuación:

$$\left(\frac{P}{w} + Z \right)_o - \left(\frac{P}{w} + Z \right)_i = C_1 \frac{2g}{V^2} \quad (47)$$

C, varía entre 1.3 y 3.2.

De la ecuación (47) se deduce:

$$Q = CA \sqrt{2g (P_o/w + Z_o - P_i/w - Z_i)} \quad (48)$$

C varía entre 0.56 y 0.88, pero depende del tamaño y forma del codo. El codo debe calibrarse directamente para poderlo usar como medidor de descarga.

REFERENCIAS:

"Elementary Fluid Mechanics".

por John K. Vennard.

"Elementary Mechanics of Fluids".

por Hunter Rouse.

"Engineering Hydraulics"

Editado por Hunter Rouse.

"Open Channel Hydraulics"

por Ven Te Chow.

"Tratado de Hidráulica Aplicada"

por Herbert Addison.

Cualquiera que sea el procedimiento que los colombianos escojan para hacer de sus Patria una unidad apreciable dentro del mundo y un país amable para las generaciones venideras, hay que empeñarse en dominar los instrumentos de la ciencia y de la técnica en estos años próximos, con un sentido de urgencia que no tiene precedentes en nuestra historia, sino tal vez en la guerra de Independencia, cuando se trataba de crear y defender una república nacida prácticamente de la nada.

Alberto Lleras Camargo