

# Estimación de coeficientes de descarga en orificios circulares de pared delgada, en modelos físicos<sup>1</sup>

Josué Rodríguez Santos<sup>2</sup>, Manuel Gómez de la Torre<sup>3</sup>, Andrea Arellano Guevara<sup>4</sup>, Carlos Romero Castillo<sup>5</sup>, Francisco Córdova Rizo<sup>6</sup>

## Resumen

**Introducción** Esta investigación se busca la conceptualización de las teorías y el desarrollo metodológico para lograr el **objetivo** que es contribuir al conocimiento experimental acerca de coeficientes de descarga para orificios circulares de pared delgada, no sumergidos, dada la limitada información encontrada sobre los mismos. Los **Materiales y métodos** consistieron en desarrollar un modelo físico experimental, que se desarrolló en el Laboratorio Piloto de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil – Ecuador, ubicado a 4,00 m.s.n.m., con una temperatura ambiente promedio

de 26 °C y una humedad relativa media del 75 %. Se construyeron 8 orificios circulares entre 6 y 48 mm de diámetro usando como material el polimetilmetacrilato (acrílico), fueron considerados aproximadamente 300 datos a través del método experimental, en el cual, el caudal real se evaluó volumétricamente, mientras que, el coeficiente de descarga se determinó mediante la relación entre caudal real y caudal teórico, teniendo como **resultados** coeficientes de descarga que oscilan entre 0,76–0,56, resultados presentados en el ábaco FCMF-UG-Cd-OCPD-2018, que considera el coeficiente de descarga vs la relación carga hidrostática/diámetro del orificio. Mediante comparaciones con fuentes

1 Artículo original generado y financiado por el Laboratorio Piloto de Hidráulica–Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas–Universidad de Guayaquil, del proyecto de investigación Coeficientes de Descarga en Orificios de Pared Delgada, No Sumergidos, Fecha de realización entre abril – junio 2018.

2 Ingeniero Civil, MSc., Docente Titular Agregado, Universidad de Guayaquil, ORCID 0000-0002-1195-7153, ID Scopus 57201856510, Correo electrónico: josue.rodriguez@ug.edu.ec, josue-eddy@hotmail.com

3 Ingeniero Civil, MSc., Docente Titular, Universidad de Guayaquil, ORCID 0000-0001-5904-6087, Correo electrónico: manuel.gomezdelatorreg@ug.edu.ec, nachito\_74@hotmail.com

4 Ingeniera Civil, ORCID 0000-0002-1780-7666, Correo electrónico: andsolarell@gmail.com

5 Ingeniero Civil, ORCID 0000-0002-6236-6919, Correo electrónico: romerocarlos336@gmail.com

6 Ingeniero Civil, MSc., Docente Titular Principal, Universidad de Guayaquil, ORCID 0000-0002-3384-1805, Correo electrónico: francisco.cordovar@ug.edu.ec, jacori1956@hotmail.com

Artículo recibido: 1/05/2018 Artículo aprobado: 19/07/2018

Autor para correspondencia, Josué Rodríguez Santos, E-mail: josue-eddy@hotmail.com

bibliográficas. **Conclusión.** Los valores de coeficientes de descarga obtenidos en esta investigación son válidos según las condiciones de flujo de estudio, siendo estos de gran aporte a estas estructuras donde se emplea orificios como desarenadores, captaciones y sumideros.

**Palabras clave:** Orificios circulares, coeficientes de descarga, orificios de pared delgada

## Estimation of discharge coefficients for orifices thin-walled, in physical models

### Abstract

**Introduction** This research seeks the conceptualization of the theories and the methodological development to achieve the **objective** that is to contribute to the experimental knowledge about discharge coefficients for circular holes of thin wall, not submerged, given the limited information found on them. The **Materials and methods** consisted of developing an experimental physical model, which was developed in the Pilot Laboratory of Hydraulics of the Faculty of Mathematical and Physical Sciences, University of Guayaquil–Ecuador, located at 4.00 meters above sea level, with an average ambient temperature of 26 ° C and an average relative humidity of 75%. We built 8 circular holes between 6 and 48 mm in diameter using polymethylmethacrylate (acrylic) as a

material, approximately 300 data were considered through the experimental method, in which, the actual flow was evaluated volumetrically, while the discharge coefficient was determined by the relationship between real flow and theoretical flow rate, resulting in discharge coefficients ranging between 0.76–0.56, **results** presented in the abacus FCMF-UG-Cd-OCPD-2018, which considers the discharge coefficient vs the hydrostatic head / hole diameter ratio. Through comparisons with bibliographic sources. **Conclusion:** The values of discharge coefficients obtained in this investigation are valid according to the study flow conditions, these being of great contribution to these structures where holes are used such as desarenadores, catchments and drains.

**Keywords:** Circular orifices, discharge coefficients, orifices thin-walled

## Estimativa dos coeficientes de descarga em orifícios circulares de paredes delgadas, em modelos físicos

### Resumo

**Introdução** Esta conceituação de teorias e desenvolvimento metodológico pesquisa visa atingir o **objetivo** que é o de contribuir para o conhecimento experimental sobre coeficientes de descarga para furos circulares de paredes finas, não submersa, dada a pouca informação encontrada neles.

**Materiais e métodos** foram desenvolver um modelo experimental físico, o que foi desenvolvido no Piloto Hidráulica Laboratório da Faculdade de matemática e Physical Sciences, University of Guayaquil—Equador, localizado 4,00 m, com uma temperatura ambiente média de 26 ° C e umidade relativa média de 75%. 8 furos circulares, entre 6 e 48 mm de diâmetro, usando como material de polimetilmetacrilato (acrílico) foram construídos, foram consideradas aproximadamente 300 de dados por meio de método experimental, em que o caudal real foi avaliada volumetricamente enquanto o coeficiente de descarga determinada pela relação entre o caudal actual e o fluxo teórico, com os coeficientes de descarga **resultado** que variam 0,76-

0,56, os resultados apresentados na FCMF-UG-Cd-OCPD-2018 ábaco, que considera o coeficiente de descarga vs a relação de diâmetro cabeça hidrostática / buraco. Através de comparações com fontes bibliográficas. **Conclusão** coeficientes de descarga valores obtidos nesta investigação são válidos como as condições de escoamento de estudo, sendo estas grande contribuição para essas estruturas onde furos como armadilhas de areia, depósitos e pias utilizados.

**Palavras chave:** Orifícios circulares, coeficientes de descargas, orifícios de paredes delgadas

---

## Introducción

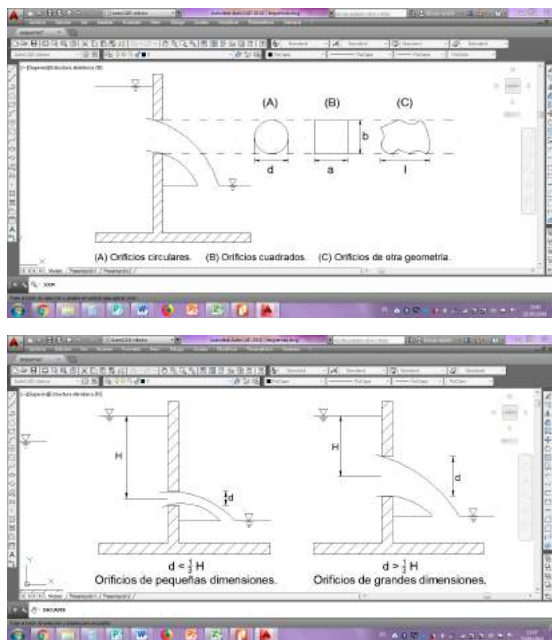
Los orificios son parte de las obras de la ingeniería hidráulica, estos se consideran como estructuras de control (Barragán M, 1993), sin embargo, se ha encontrado escasa información bibliográfica, específicamente de los coeficientes de descarga para orificios circulares de pared delgada, situación que ha motivado esta investigación. La importancia de las estructuras de control se debe al uso que se la da para la medición y regulación de caudales (Barragán M, 1993), (Silva, 2011). La medición de caudales se realiza a través de la cantidad de masa que circula en un determinado tiempo por un sistema de control (García Gutierrez, y otros, 1999), se lo determina de dos formas: directamente, mediante dispositivos de desplazamiento, e indirectamente por medio de dispositivos que controlan

la presión diferencial, área variable, velocidad, conformación del orificio, aceleración de la gravedad (García Gutierrez, y otros, 1999).

Entre las estructuras de control más utilizadas para regular y medir caudales se encuentran los orificios y vertederos (Barragán M, 1993), (Silva, 2011), (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1992). Desde el punto de vista hidráulico, los orificios se consideran como perforaciones en una superficie, poseen forma regular y perímetro cerrado, y se pueden realizar en reservorios, canales, tanques, tuberías, captaciones (Silva, 2011), (Rodríguez Díaz, 2000), (Azevedo Netto, 1998), (Sotelo Ávila, 2002).

En la figura N° 1, según las condiciones de trabajo, un orificio descarga libremente cuando el nivel del fluido (aguas abajo)

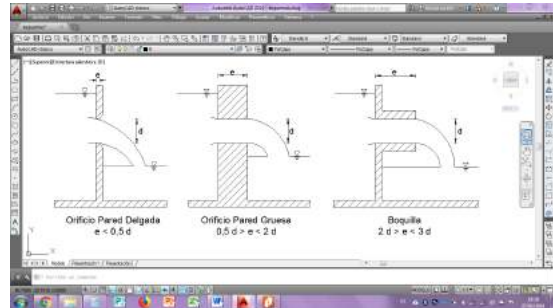
se encuentra por debajo de la perforación (Silva, 2011), (Rodríguez Díaz, 2000), (Azevedo Netto, 1998), (Sotelo Ávila, 2002); cuando el nivel del fluido se localiza por encima del orificio se considera que la descarga es sumergida o ahogada (Silva, 2011), (Rodríguez Díaz, 2000), (Azevedo Netto, 1998), (Sotelo Ávila, 2002). Además, se pueden clasificar según su forma o geometría: circulares, cuadrados, rectángulos, y según su tamaño: orificios de pequeñas dimensiones y de grandes dimensiones (Rodríguez Díaz, 2000), (Azevedo Netto, 1998). Cuando el diámetro de la perforación es menor a un tercio de la profundidad del fluido hasta su baricentro, se lo denomina orificio de pequeñas dimensiones, caso contrario es un orificio de grandes dimensiones (Rodríguez Díaz, 2000), (Azevedo Netto, 1998).



**Figura N° 1.** Orificios según su geometría y dimensiones.

**Fuente:** Elaboración de los autores

Considerando el espesor de la pared en la que se encuentra el orificio, se clasifica en: pared delgada, pared gruesa y pared ancha (Silva, 2011), (Rodríguez Díaz, 2000), (Sotelo Ávila, 2002) como se muestra en la figura N° 2.

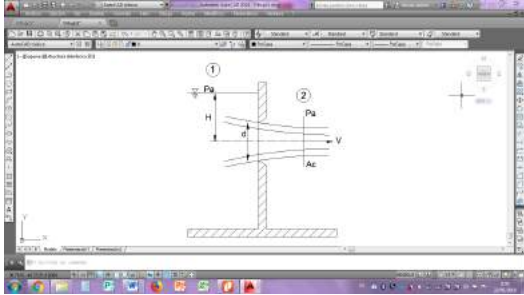


**Figura N° 2.** Clasificación de los orificios según el espesor de pared.

**Fuente:** Elaboración de los autores

Se estima que el orificio es de pared delgada cuando el espesor de esta es menor a 0,50 veces el diámetro de la perforación, de pared gruesa cuando el espesor de la pared está comprendido entre 0,50 y 2 veces el diámetro del orificio (Sotelo Ávila, 2002), (Camatón, Encalada, & Pavón, 2018). Cuando el espesor de la pared se encuentra entre 2 y 3 veces el diámetro de la perforación, se tiene el caso de una boquilla (pared ancha) (Azevedo Netto, 1998), estas están constituidas por piezas adaptadas a los orificios, su función es dirigir el chorro del fluido. El chorro que se descarga libremente a través de un orificio se lo denomina vena líquida y su trayectoria es parabólica (Rodríguez Díaz, 2000).

## Modelo Matemático



**Figura N° 3.** Orificio de Pared Delgada con descarga libre.

**Fuente** Elaboración de los autores

En un orificio tal como se muestra en la figura N° 3, las partículas del fluido que se acercan a la abertura se mueven en dirección al baricentro (Rodríguez Díaz, 2000), (Sotelo Ávila, 2002), por lo que, la deflexión produce una contracción del chorro a la que se le denomina sección contraída " $A_c$ " " $A_c$ ", la cual posee un área menor al área del orificio " $A$ " " $A$ ", en la sección contraída se considera que las partículas son uniformes y poseen un valor medio de velocidad " $V$ " " $V$ ", bajo la misma carga " $H$ " " $H$ " (Azevedo Netto, 1998), (Sotelo Ávila, 2002).

Se asume que la carga del fluido " $H$ " " $H$ ", permanece constante, bajo esta condición el orificio descarga un caudal teórico " $Q_t$ " " $Q_t$ ", cuya ecuación se determina a partir del trinomio de Bernoulli, entre la superficie libre del fluido "Punto 1" y la sección contraída del chorro "Punto 2" (Rodríguez Díaz, 2000), (Azevedo Netto, 1998), (Sotelo Ávila, 2002), trinomio de Bernoulli expresado así:

$$(Ecuación N° 1) \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + H = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + H_2$$

Para la ecuación N° 1 se considera que el plano referencial pasa por el baricentro del orificio, al no existir velocidad del fluido en el punto 1 (Rodríguez Díaz, 2000), y al ser la presión atmosférica la misma en los puntos 1 y 2 del fluido, esta se anula (Azevedo Netto, 1998), de aplicar estas condiciones en la ecuación N° 1 se obtiene la velocidad teórica del fluido a la salida del orificio (ecuación de Torricelli) (Azevedo Netto, 1998), (Sotelo Ávila, 2002).

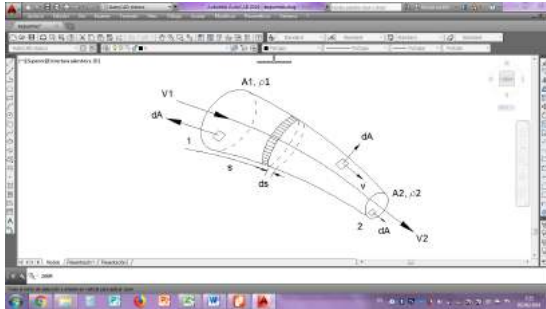
$$(Ecuación N° 2) V = \sqrt{2gH}$$

Según el principio de conservación de materia, la masa de un fluido en una unidad de tiempo entra a un volumen especificado dentro del flujo, una parte de esta queda almacenado en el interior y el resto sale del volumen (Sotelo Ávila, 2002), (Ven Te Chow, 1994), suponiendo que el volumen estudiado es de forma y magnitud constante, llamado volumen de control, el almacenaje no puede ser indefinido (Sotelo Ávila, 2002). La cantidad de masa que entra y sale, sumadas algebraicamente, según el principio de conservación de la materia, se expresa como:

$$\left( \begin{array}{l} \text{Cantidad neta de masa} \\ \text{que atraviesa la superficie} \\ \text{de frontera del volumen,} \\ \text{en la unidad de tiempo} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{Rapidez de variación} \\ \text{de la masa contenida} \\ \text{en el volumen} \end{array} \right) = 0$$

Este principio aplicado a un volumen de control de tamaño diferencial que a unofinito (figura N° 4), deriva la llamada ecuación de continuidad (Ven Te Chow, 1994).





**Figura N° 4.** Ecuación de continuidad para una vena líquida.

**Fuente** Elaboración de los autores

En una vena líquida, en un punto donde la velocidad en una misma sección se la considera como media " $V$ ", el volumen elemental de la vena líquida se encuentra separada por una distancia " $ds$ ", la cual representa la coordenada que sigue el eje de la vena líquida, y tomando en cuenta la rapidez con la que varía la masa, se establece según el principio de conservación de masa que (Sotelo Ávila, 2002):

$$(Ecuación N° 3) \quad \frac{\partial(\rho VA)}{\partial s} ds + \frac{\partial}{\partial t} (\rho A ds) = 0$$

De resolver la ecuación anterior se obtiene la ecuación de Continuidad (Sotelo Ávila, 2002):

$$(Ecuación N° 4) \quad Q = AV$$

De aplicar en la ecuación de Continuidad la velocidad teórica del fluido (Sotelo Ávila, 2002), se obtiene que el caudal teórico " $Q_t$ ", siendo esta ecuación conocida como la Ecuación General para descarga en un Orificio de pared delgada, no sumergido, expresándose así (Rodríguez Díaz, 2000), (Azevedo Netto, 1998), (Sotelo Ávila, 2002):

$$(Ecuación N° 5) \quad Q_t = A \sqrt{2gH}$$

El modelo teórico matemático de descarga no se ajusta a la realidad, razón por la cual este debe ser corregido por un coeficiente de descarga " $C_d$ ", para estimar el caudal real " $Q_r$ ".

$$(Ecuación N° 6) \quad Q_r = C_d Q_t$$

Para obtener el coeficiente de descarga " $C_d$ " de forma experimental, es necesario partir del caudal teórico " $Q_t$ " y el caudal real " $Q_r$ ", tomando de base la ecuación 6, y se expresa como (Rodríguez Díaz, 2000):

$$(Ecuación N° 7) \quad C_d = \frac{Q_r}{Q_t}$$

De forma experimental el caudal real " $Q_r$ " se consigue a través de la evacuación de cierto volumen " $Vol.$ " en un intervalo de tiempo determinado " $t$ " a través del orificio (Rodríguez Díaz, 2000).

$$(Ecuación N° 8) \quad Q_r = \frac{Vol.}{t}$$

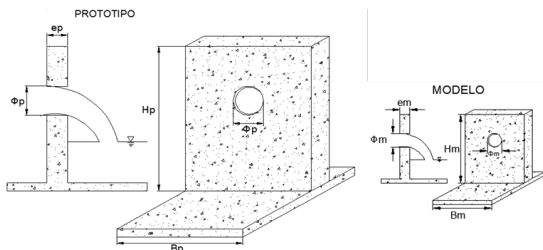
Reemplazando las ecuaciones N° 5 y N° 8 en la ecuación N° 7, se obtiene el coeficiente de descarga " $C_d$ " de forma experimental, siendo este adimensional (Rodríguez Díaz, 2000).

$$(Ecuación N° 9) \quad C_d = \frac{Vol.}{A \sqrt{2gH} t}$$

## Similitud Hidráulica

La Hidráulica al ser una ciencia empírica, no maneja teorías generales, debido a lo difícil de establecer procedimientos totalmente analíticos, ya que no siempre generan soluciones óptimas, la modelación hidráulica plantea soluciones óptimas y sus resultados guardan relación directa con el comportamiento del fenómeno real, razón por la cual es necesario recurrir a la experimentación en modelos físicos reducidos de los prototipos (Silva, 2011), (Sotelo Ávila, 2002), (Simon, 1982).

La similitud indica las condiciones de funcionamiento del prototipo a partir de ensayos realizados en modelos físicos, siendo el fundamento de la modelación hidráulica (Rodríguez, Valero, & Mendoza, 2015). Para que un modelo sea válido, se necesita mantener tres similitudes básicas: similitud geométrica, similitud cinemática y similitud dinámica (Silva, 2011), (Sotelo Ávila, 2002), (Simon, 1982), (Rodríguez, Valero, & Mendoza, 2015). La figura N° 5 muestra el modelo y el prototipo, siendo el modelo el que se produce en laboratorio y tiene dimensiones menores; el prototipo es la estructura a construir (Sotelo Ávila, 2002).



**Figura N° 5.** Similitudes entre modelo y prototipo.

**Fuente:** Elaboración de los autores

La similitud geométrica indica que todas las longitudes del prototipo y modelo deben tener la misma razón (Silva, 2011), (Simon, 1982), es decir que las relaciones entre magnitudes homólogas se deben mantener, siendo " $l_s$ " " $l_s$ " la escala de líneas que cuantifica el tamaño relativo de los dos sistemas (Sotelo Ávila, 2002), (Rodríguez, Valero, & Mendoza, 2015).

$$l_s = \frac{H_p}{H_m} = \frac{\Phi_p}{\Phi_m} = \dots$$

La similitud geométrica exacta refleja que las relaciones de áreas y volúmenes se pueden expresar en términos del cuadrado y cubo de " $l_s$ " " $l_s$ " (Sotelo Ávila, 2002), (Simon, 1982), (Rodríguez, Valero, & Mendoza, 2015).

$$A_s = \frac{A_p}{A_m} = l_s^2 ; \quad V_s = \frac{V_p}{V_m} = l_s^3$$

Se debe considerar que la escala vertical puede ser distinta a la escala horizontal en casos donde la profundidad del agua sea pequeña, a estos modelos se los conoce como modelos distorsionados (Sotelo Ávila, 2002), (Rodríguez, Valero, & Mendoza, 2015). La semejanza cinemática implica que tanto las velocidades y aceleraciones en puntos homólogos entre el modelo y el prototipo son las mismas (Silva, 2011), (Sotelo Ávila, 2002), (Rodríguez, Valero, & Mendoza, 2015). Esto quiere decir que las líneas de corriente de ambos flujos son semejantes de forma geométrica (Silva, 2011).

$$\left[ \frac{|\vec{V}_m|}{|\vec{V}_p|} \right]_1 = \left[ \frac{|\vec{V}_m|}{|\vec{V}_p|} \right]_2 = \dots = \left[ \frac{|\vec{V}_m|}{|\vec{V}_p|} \right]_n$$

$$\left[ \frac{|\vec{a}_m|}{|\vec{a}_p|} \right]_1 = \left[ \frac{|\vec{a}_m|}{|\vec{a}_p|} \right]_2 = \dots = \left[ \frac{|\vec{a}_m|}{|\vec{a}_p|} \right]_n$$

La similitud dinámica indica que en un mismo punto del prototipo y el modelo las fuerzas que actúan en el deben ser coincidentes, tanto en dirección y sentido de los vectores fuerza (Silva, 2011), (Simon, 1982).

$$\left[ \frac{|\vec{F}_m|}{|\vec{F}_p|} \right]_1 = \left[ \frac{|\vec{F}_m|}{|\vec{F}_p|} \right]_2 = \dots = \left[ \frac{|\vec{F}_m|}{|\vec{F}_p|} \right]_n = \left[ \frac{m_m \cdot |\vec{a}_m|}{m_p \cdot |\vec{a}_p|} \right]_n$$

Es imposible tener físicamente similitud en todas las fuerzas, por lo que se da prioridad a las fuerzas más importantes del sistema, es decir aquellas que condicionan al fenómeno (Silva, 2011), (Rodríguez, Valero, & Mendoza, 2015), por medio de parámetros como los números de Euler, Froude, Reynolds y Cauchy (Sotelo Ávila, 2002), (Rodríguez, Valero, & Mendoza, 2015). Si existe similitud geométrica y similitud dinámica se considera que existe similitud cinemática (Silva, 2011), (Simon, 1982) y el modelo se encuentra diseñado de forma correcta para representar los fenómenos que ocurren en el prototipo de forma experimental en el modelo hidráulico (Sotelo Ávila, 2002).

## Materiales y Métodos

En el Laboratorio Piloto de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Matemáticas y

Físicas de la Universidad de Guayaquil – Ecuador, ubicado a 4,00 m.s.n.m., se construyó el modelo donde se realizaron los ensayos experimentales para la determinación de coeficientes de descarga en orificios circulares, no sumergidos de pared delgada, con una temperatura ambiente, promedio de 26 ° C.

El modelo consiste en una estructura rectangular de acero, de 3,80 m de alto, la cual sirve de soporte a una tubería de PVC de 160 mm de diámetro nominal, en la parte inferior de la tubería posee un accesorio “tipo Tee”- 160 mm de diámetro, conectado a un tubo Venturi, 160 mm en su diámetro mayor y 50 mm en su diámetro menor, en cada uno de los diámetros se instaló un piezómetro para determinar las cargas de presión, por medio de las cuales fue factible calibrar el caudal de descarga de los orificios, generado por mediciones volumétricas. A través de un sistema de bombeo se alimentó la tubería de 160 mm de diámetro, la cual da la carga hidrostática a los orificios estudiados. Los diferentes orificios, construidos en placas acrílicas, fueron instalados en una posición posterior al tubo Venturi.

Se construyeron un total de 8 placas acrílicas, cuadradas de 100 mm de lado, de las cuales, 7 tienen un espesor de 4 mm, en donde se encuentran los orificios de 12, 18, 24, 30, 36, 42 y 48 mm de diámetro.

La placa restante (6 mm de diámetro), cuenta con espesor de 3 mm, para cumplir la condición de pared delgada. El caudal real se determinó volumétricamente de acuerdo a la ecuación N° 8.



## Resultados

La Tabla N° 1, presenta datos para el orificio de 6 mm de diámetro, este orificio se ha escogido como cálculo tipo de los 8 orificios.

La tabla de resultados de los orificios consideran los siguientes parámetros:

" $H$ "", altura hidrostática o carga de presión promedio en base a las lecturas " $h_1$ " y " $h_2$ " tomadas de los piezómetros.

" $Q_r$ "", caudal real obtenido por mediciones volumétricas.

" $Q_t$ "", caudal teórico encontrado a partir del área real del orificio " $A$ " y la altura promedio " $H$ ". El área real del orificio se lo obtuvo a través de 6 valores de diámetros obtenidos con un escalímetro digital.

" $C_d$ "", coeficiente de descarga, resulta de dividir el caudal real para el caudal teórico.

" $H/\phi$ "", Relación entre altura promedio para el diámetro real del orificio.

**Tabla N° 2.** Cálculo Tipo para el orificio de 6 mm

*Fuente: Elaboración de los autores*

| Nº | $\Phi$ (mm) | Área (cm <sup>2</sup> ) | H (cm) | Vol. (ml) | Tiempo (s) | Qr (ml/s) | V (cm/s) | Qt (cc/s) | H/ $\Phi$ | Cd     |
|----|-------------|-------------------------|--------|-----------|------------|-----------|----------|-----------|-----------|--------|
| 1  |             |                         | 11,55  | 6130      | 155,76     | 39,355    | 150,862  | 51,248    | 17,562    | 0,7654 |
| 2  |             |                         | 14,35  | 6260      | 145,58     | 43,000    | 168,086  | 57,099    | 21,820    | 0,7529 |
| 3  |             |                         | 16,95  | 5960      | 128,56     | 46,360    | 182,631  | 62,041    | 25,773    | 0,7448 |
| 4  | 6,58        | 0,3397                  | 20,15  | 6010      | 121,32     | 49,538    | 199,079  | 67,628    | 30,639    | 0,7330 |
| 5  |             |                         | 23,35  | 6070      | 115,41     | 52,595    | 214,268  | 72,788    | 35,504    | 0,7226 |
| 6  |             |                         | 25,55  | 6050      | 110,11     | 54,945    | 224,114  | 76,133    | 38,849    | 0,7204 |
| 7  |             |                         | 29,25  | 6240      | 107,11     | 58,258    | 239,764  | 81,449    | 44,475    | 0,7156 |
| 8  |             |                         | 34,85  | 6242      | 99,22      | 62,911    | 261,675  | 88,892    | 52,990    | 0,7076 |
| 9  |             |                         | 45,35  | 5590      | 94,14      | 59,380    | 297,796  | 85,373    | 75,062    | 0,6962 |
| 10 |             |                         | 71,00  | 11160     | 151,64     | 73,595    | 373,298  | 107,018   | 117,559   | 0,6877 |
| 11 | 6,04        | 0,2867                  | 105,35 | 8815      | 98,67      | 89,338    | 455,070  | 130,461   | 174,414   | 0,6839 |
| 12 |             |                         | 149,60 | 10740     | 101,80     | 105,501   | 541,136  | 155,135   | 247,634   | 0,6803 |
| 13 |             |                         | 204,80 | 9180      | 74,33      | 123,503   | 633,736  | 181,682   | 338,979   | 0,6788 |

## Diagrama

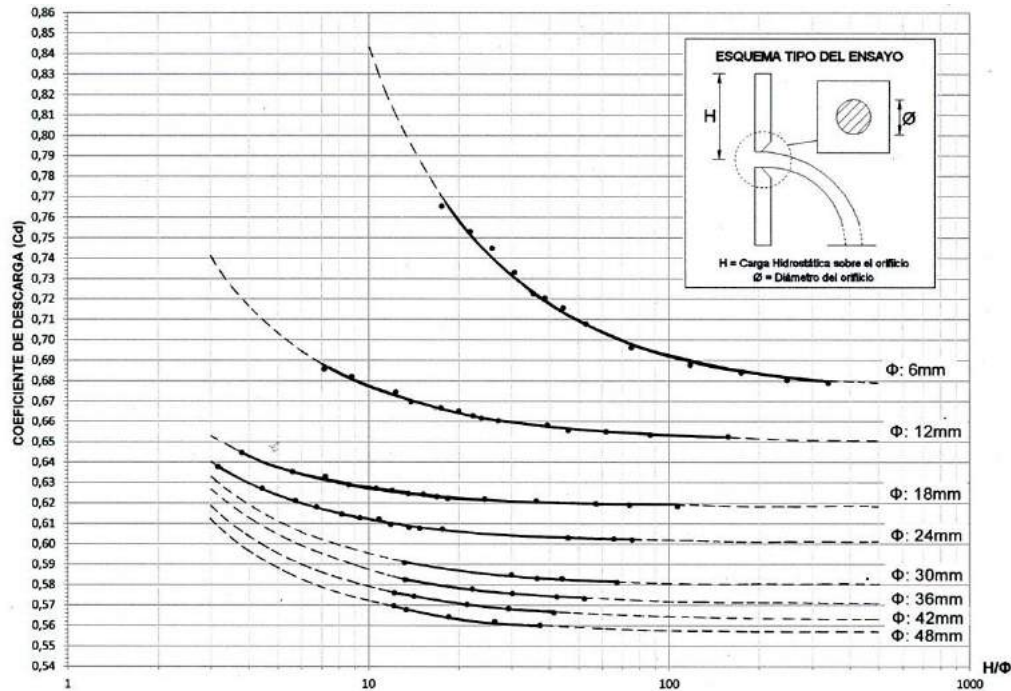


Figura N° 6. FCMF-UG-Cd-OCPD-2018.  
Fuente: Elaboración de los autores

La figura N° 6 representa los coeficientes de descarga que se encontraron para cada uno de los orificios circulares estudiados bajo la relación carga hidrostática/ diámetro del orificio, los coeficientes de descarga para orificios con diámetros comprendidos entre 6 y 48 mm oscilan entre 0,765 – 0,560.

## Discusión

La escasa información existente para la determinación de los coeficientes de descarga en orificios de pared delgada no sumergidos, presentados en ábacos y tablas, proporcionan rangos de valores sin ningún sustento de cómo

aplicarlos adecuadamente a este tipo de estructuras. Con el pasar de los años, no ha habido la actualización suficiente para la determinación de los coeficientes de descarga en orificios, es decir, existe tablas y gráficos que proveen diferentes autores sobre cómo encontrar estos coeficientes, pero siempre con limitantes. Gilberto Sotelo en su libro Hidráulica General menciona que, mediante un estudio adimensional, se demostró que los coeficientes de descarga dependen exclusivamente del número de Reynolds " $Re$ " " $Re$ ", para orificios circulares en donde " $Re$ " " $Re$ " es mayor a  $10^5$  los coeficientes de descarga son independientes de dicho número y toma un valor constante de

0,60 (Sotelo Ávila, 2002).

A su vez, Handbook of Hydraulics de H. King, presenta estudios realizados por Smith and Walker, Judd and King, Medaugh and Johnson y Strickland, para orificios de 2,50 cm de diámetro con coeficientes de descarga superiores a 0,594. Contrastando las fuentes anteriores, la presente investigación genera el diagrama " $C_d$ " vs " $H/\phi$ "; en donde se observa que mientras el diámetro de los orificios " $\phi$ " aumenta su tamaño, los coeficientes de descarga " $C_d$ " disminuyen significativamente su valor, esto se da para todos los orificios que se estudiaron en esta investigación.

Los libros de H. King (King, Brater, Lindell, & Wei, 1996), Azevedo Netto (Azevedo Netto, 1998) y Fernández Díez (Fernández Díez, 2000), muestran en sus tablas que el coeficiente de descarga " $C_d$ ", también disminuye según va aumentando el diámetro del orificio, guardando una relación con el diagrama generado en esta investigación. Cabe señalar que los textos antes citados, para orificios con diámetros entre 5 y 30 cm, y cargas menores a 1 m, los coeficientes de descarga " $C_d$ " aumentan su valor, diámetros que no fueron considerados en el presente estudio.

Los valores de coeficientes de descarga " $C_d$ " para orificios con diámetros entre 0,60 y 4,80 cm, encontrados en esta investigación, oscilan entre 0,765

y 0,560, para cargas máximas de hasta 2,30 m. Siendo similares a los valores determinados por Arreaga Paredes en su estudio (Arreaga Paredes & Mantilla Villalta, 2016). Los coeficientes de descarga " $C_d$ " mostrados en los textos de H. King (King, Brater, Lindell, & Wei, 1996) y Fernández Díez (Fernández Díez, 2000) para orificios de diámetros entre 0,50 y 5 cm con cargas de hasta 2,30 m, oscilan entre 0,657 y 0,599. Estos valores difieren de los encontrados en esta investigación debido a las condiciones del fluido, ya que utilizaron mezclas de fluidos, glicerina y algunos aceites (King, Brater, Lindell, & Wei, 1996). Azevedo Netto muestra coeficientes de descarga " $C_d$ " para orificios de diámetros entre 2 y 5 cm con cargas de hasta 2,30 m, oscilan entre 0,653 y 0,607, mostrando una diferencia significativa con los coeficientes de descarga encontrados en esta investigación y los mostrados por H. King (King, Brater, Lindell, & Wei, 1996) y Fernández Díez (Fernández Díez, 2000).

## Conclusión

Se realizó la experimentación en laboratorio a través de las placas acrílicas diseñadas para cada diámetro de orificio circular mediante las cuales se obtuvo los datos experimentales que sirvieron para el cálculo de los coeficientes de descarga, los cuales se encuentran en un rango de 0,76 a 0,56, valores que generaron el ábaco FCMF-UG-Cd-OCPD-2018 que sirve de gran aporte a estructuras donde se emplea

orificios tales como desarenadores, captaciones y sumideros, por lo tanto se concluye que estos coeficientes de descarga son considerados válidos mediante comparaciones realizadas con otras fuentes bibliográficas, según las condiciones de flujo.

Se determinó que el coeficiente de descarga disminuye, conforme se incrementa el diámetro del orificio.

## Recomendación

Determinar el modelo matemático para la determinación de coeficientes de descarga, presentados en el ábaco FCMF-UG-Cd-OCPD-2018, modelo matemático que se aplicaría a cualquier diámetro de orificio.

El modelo físico construido permitirá investigar experimentalmente los coeficientes de descarga en orificios de pared gruesa, pared ancha y chimeneas de equilibrio. Además se podría investigar la distancia y fuerza de impacto del chorro para el diseño de obras de protección para evitar socavación.

## Referencias

Arreaga Paredes, W., & Mantilla Villalta, D. (2016). Determinación de Coeficientes de Descarga en Orificios Circulares, de pared delgada en descarga libre para diferentes diámetros en modelos físicos. Guayaquil, Ecuador.

Azevedo Netto, J. (1998). *Manual de Hidráulica* (Octava ed.). Brazil: Edgard Blucher Ltda.

Barragán M, C. (1993). Calibración de Estructuras de Control. Bogota, Colombia: IDEAM.

Camatón, S., Encalada, J., & Pavón, C. (2018). Breve recuento histórico del desarrollo de la mecánica cuántica. *Espirales Revista multidisciplinaria de investigación*, 11(14). Obtenido de <https://doi.org/10.31876/re.v2i14.186>

Fernández Díez, P. (2000). Obtenido de Biblioteca sobre Ingeniería Energética: <http://es.pfernandezdiez.es/?pageID=8>

García Gutiérrez, L., Barón Periz, A., Corominas Masip, J., Díaz Mora, J., Bayó Dalmau, A., & Loaso Vierbucher, C. (1999). Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado. *Medida y Evaluación de las Extracciones de Agua Subterránea*, 21-42.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (1992). Manual de Aforos. México.

King, H., Brater, E., Lindell, J., & Wei, C. (1996). *Handbook of Hydraulics* (Séptima ed.). McGRAW HILL.

Rodríguez Díaz, A. (2000). *Hidráulica Experimental*. Bogota, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rodríguez, J., Valero, C., & Mendoza, K. (Julio-Diciembre de 2015). Análi-

sis experimental de coeficientes de descarga en vertederos trapezoidales de pared delgada–Parte 1. *Yachana*, 4(2).

Silva, F. (2011). *Mecánica de Fluidos*. España: UTN.

Simon, A. (1982). *Hidráulica Básica*. México: LIMUSA.

Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica General* (Vol. I). México: Limusa.

Ven Te Chow. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Mc Graw Hill.