



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

MEDICIÓN DE FLUJO EN COMPUERTAS Y ORIFICIOS

Andy Williams Alonzo Vásquez

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, julio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MEDICIÓN DE FLUJO EN COMPUERTAS Y ORIFICIOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ANDY WILLIAMS ALONZO VÁSQUEZ

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, JULIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Walter Rolando Salazar González
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MEDICIÓN DE FLUJO EN COMPUERTAS Y ORIFICIOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha febrero de 2013.

Andy Williams Alonzo Vásquez

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 26 de Junio de 2013

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Andy Williams Alonzo Vásquez, quien se identifica con carné No. 2007-14571, titulado MEDICIÓN DE FLUJO EN COMPUERTAS Y ORIFICIOS, después de haber hecho las correcciones necesarias lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.

"ID y Enseñad a Todos"

LUIS M. SANDOVAL MENDOZA
INGENIERO CIVIL
Colegiado No. 6496

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Colegiado No. 6496



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
17 de julio de 2013

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

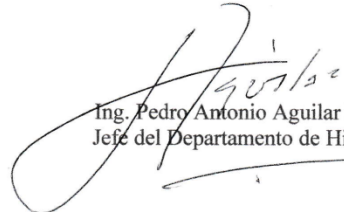
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **MEDICIÓN DE FLUJO EN COMPUERTAS Y ORIFICIOS**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Andy Williams Alonzo Vásquez, quien contó con la asesoría del Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua






USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Andy Williams Alonzo Vásquez, titulado MEDICIÓN DE FLUJO EN COMPUERTAS Y ORIFICIOS, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Morfenegro Franco



Guatemala, julio de 2013.

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continúa



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 522.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **MEDICIÓN DE FLUJO EN COMPUERTAS Y ORIFICIOS**, presentado por el estudiante universitario **Andy Williams Alonzo Vásquez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 26 de julio de 2013

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres	Edwin Werley Alonzo Ochoa y Sara Antonieta Vásquez.
Mis hermanos	Franz Rodelby Wesley, Neidy Massiel y Shirley Larissa Estefani Alonzo Vásquez.
Mis abuelas	Irma Joaquina Vásquez y Lucila Ochoa Rosales.
Mis tíos	Roberto Antonio Angel Rabanales, Bonifacio Ceferino y Mauda Alejandra Ramos Vásquez.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por su inmutable presencia.
Universidad de San Carlos de Guatemala	La Escuela de Ingeniería Civil.
Mis asesores	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza e Ing. Carlos Salvador Gordillo.
Mis profesores	
Mis amigos y compañeros	
Mi colaborador y amigo	Marvin Estuardo Hernández Lorente.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MEDICIÓN DE CAUDALES EN COMPUERTAS Y ORIFICIOS	1
1.1. Compuertas	1
1.1.1. Definición y uso	1
1.1.2. Clasificación.....	2
1.2. Orificios.....	10
1.2.1. Definición y uso	10
1.2.2. Clasificación de orificios.....	11
1.2.2.1. Orificios con descarga libre.....	12
1.2.2.2. Orificios sumergidos o ahogados.....	12
1.2.2.3. Orificios de pared delgada	14
1.2.2.4. Orificios de pared gruesa.....	14
1.2.2.5. Orificio de tubo.....	15
2. PRINCIPIOS HIDRÁULICOS EN COMPUERTAS DE FONDO Y ORIFICIOS CIRCULARES DE PARED DELGADA.....	17
2.1. Compuertas de fondo	17
2.1.1. Funcionamiento hidráulico	17
2.1.2. Ecuaciones de cálculo del caudal.....	21

2.1.3.	Coeficiente de contracción	22
2.1.4.	Coeficiente de velocidad	22
2.1.5.	Coeficiente de descarga.....	23
2.1.6.	Límites de aplicación	24
2.2.	Orificios circulares de pared delgada	25
2.2.1.	Funcionamiento hidráulico.....	25
2.2.2.	Ecuaciones de cálculo del caudal	26
2.2.3.	Coeficiente de contracción	28
2.2.4.	Coeficiente de velocidad	29
2.2.5.	Coeficiente de descarga.....	29
2.2.6.	Límites de aplicación	32
3.	ENSAYO DE COMPUERTAS DE FONDO Y ORIFICIOS CON DESCARGA LIBRE.....	33
3.1.	Criterios para el dimensionamiento de los diámetros del orificio y tamaño de la compuerta.....	33
3.2.	Material de construcción	35
3.3.	Procedimiento experimental (método de aforo volumétrico)	36
3.4.	Ensayo de compuerta	37
3.4.1.	Datos obtenidos	37
3.4.2.	Cálculos y resultados	41
3.4.3.	Gráficas.....	44
3.4.4.	Análisis de los resultados	48
3.5.	Ensayo de orificios circulares.....	51
3.5.1.	Datos obtenidos	51
3.5.2.	Cálculos y resultados	53
3.5.3.	Gráficas.....	55
3.5.4.	Análisis de resultados.....	58

4.	INSTRUCTIVO DE LA PRÁCTICA.....	63
4.1.	Ensayo de compuerta de fondo.....	63
4.1.1.	Introducción.....	63
4.1.2.	Objetivo.....	63
4.1.3.	Equipo.....	63
4.1.4.	Desarrollo de la práctica.....	64
4.1.5.	Interpretación de resultados.....	65
4.2.	Ensayo de orificios circulares de pared delgada.....	66
4.2.1.	Introducción.....	66
4.2.2.	Objetivo.....	67
4.2.3.	Equipo.....	67
4.2.4.	Desarrollo de la práctica.....	68
4.2.5.	Interpretación de resultados.....	68
	CONCLUSIONES.....	71
	RECOMENDACIONES.....	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Compuerta tipo tejado	2
2.	Compuerta basculante	3
3.	Compuerta cilíndrica	4
4.	Compuerta tipo esclusa (vista de planta)	5
5.	Compuerta tipo sector	6
6.	Compuerta tipo Stoney.....	7
7.	Compuerta tipo visera	8
8.	Compuerta plana.....	9
9.	Compuerta con descarga libre y sumergida.....	9
10.	Orificio para derivar agua	10
11.	Orificio inclinado.....	11
12.	Orificio con descarga libre.....	12
13.	Orificio sumergido totalmente.....	13
14.	Orificio sumergido parcialmente	13
15.	Orificio de pared delgada	14
16.	Orificio de pared gruesa	15
17.	Orificio de tubo	16
18.	Red de flujo para una compuerta plana	18
19.	Compuerta plana inclinada.....	19
20.	Compuerta radial.....	19
21.	Compuerta plana vertical	20
22.	Coeficiente de descarga según Cofré y Buchheister	24
23.	Orificio de descarga libre y pared delgada	26

24.	Derivación del coeficiente de descarga	30
25.	Variación de los coeficientes de velocidad, contracción y gasto con el número de Reynolds	31
26.	Dimensiones de los orificios	34
27.	Dimensiones de la compuerta	35
28.	Coeficiente de descarga experimental.....	44
29.	Caudal real contra caudal teórico a= 2 cm.	45
30.	Caudal real contra caudal teórico a= 4 cm.	45
31.	Caudal real contra caudal teórico a= 6 cm.	46
32.	Caudal real contra caudal teórico a= 8 cm.	46
33.	Caudal real contra caudal teórico a= 10 cm.....	47
34.	Caudal real contra caudal teórico a= 12 cm.....	47
35.	Caudal real contra caudal teórico a= 14 cm.....	48
36.	Correlación orificio de 15 cm.	55
37.	Correlación orificio de 10 cm.	56
38.	Correlación orificio de 5 cm.	56
39.	Deducción de la ecuación para orificio de 15 cm.....	57
40.	Deducción de la ecuación para orificio de 10 cm.....	57
41.	Deducción de la ecuación para orificio de 5 cm.....	58
42.	Comparación de caudales orificio de 15 cm.	59
43.	Comparación de caudales orificio de 10 cm.	59
44.	Comparación de caudales orificio de 5 cm.	60
45.	Comparación de caudales experimentales orificio 15 cm.	60
46.	Comparación de caudales experimentales orificio 10 cm.	61
47.	Comparación de caudales experimentales orificio 5 cm.	61

TABLAS

I.	Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 2 cm.....	38
II.	Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 4 cm.....	38
III.	Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 6 cm.....	39
IV.	Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 8 cm.....	39
V.	Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 10 cm.....	40
VI.	Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 12 cm.....	40
VII.	Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 14 cm.....	40
VIII.	Cálculos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 2 cm.....	41
IX.	Cálculos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 4 cm.....	42
X.	Cálculos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 6 cm.....	42
XI.	Cálculos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 8 cm.....	43
XII.	Cálculos obtenidos para compuerta de abertura “a” 10 cm	43
XIII.	Cálculos obtenidos para compuerta de abertura “a” 12 cm	43
XIV.	Cálculos obtenidos para compuerta de abertura “a” 14 cm	44
XV.	Coeficientes para compuerta de abertura a= 2 cm	49
XVI.	Coeficientes para compuerta de abertura a= 4 cm	49
XVII.	Coeficientes para compuerta de abertura a= 6 cm	50
XVIII.	Coeficientes para compuerta de abertura a= 8 cm	50
XIX.	Coeficientes para compuerta de abertura a= 10 cm	50
XX.	Coeficientes para compuerta de abertura a= 12 cm	51
XXI.	Coeficientes para compuerta de abertura a= 14 cm	51
XXII.	Datos para el orificio de diámetro 15 cm.....	52
XXIII.	Datos para el orificio de diámetro 10 cm.....	52
XXIV.	Datos para el orificio de diámetro 5 cm.....	53
XXV.	Cálculos obtenidos para el orificio de 15 cm.....	53
XXVI.	Cálculos obtenidos para el orificio de 10 cm.....	54
XXVII.	Cálculos obtenidos para el orificio de 5 cm.....	54

XXVIII.	Toma de datos para ensayo de compuerta de fondo	64
XXIX.	Cálculo de coeficientes de la compuerta	66
XXX.	Comparación de coeficientes de la compuerta	66
XXXI.	Toma de datos para el ensayo del orificio	68
XXXII.	Cálculo de coeficientes del orificio.....	69
XXXIII.	Comparación de coeficientes del orificio	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
a	Abertura de la compuerta
H	Altura entre la superficie libre del agua y el centro del orificio
θ	Ángulo de inclinación
A_c	Área de la vena contraída
A	Área del orificio
Q	Caudal
Q_r	Caudal real
Q_t	Caudal teórico
cm	Centímetros
cm/s	Centímetros por segundo

Cc	Coeficiente de contracción
Cd	Coeficiente de descarga
Cv	Coeficiente de velocidad
ϕ_c	Diámetro de la sección contraída
g	Aceleración de la gravedad
l	Litros
l/s	Litros por segundo
L	Longitud de la sección contraída
<	Menor que
No	Número correlativo
Re	Número de Reynolds
Δh_r	Pérdida de carga
γ	Peso específico
P	Presión

s	Segundo
t	Tiempo
y₁	Tirante antes de la compuerta
y₂	Tirante de la sección contraída
y₃	Tirante después de la compuerta
V	Velocidad
V_r	Velocidad real
V_t	Velocidad teórica
Vol	Volumen

GLOSARIO

Aforo	Medida de la cantidad de agua de una corriente por unidad de tiempo.
Biselado	Corte oblicuo en el borde de una superficie.
Capa límite	Es la zona del flujo donde se hace sentir fuertemente la rugosidad del canal.
Carga	Es una elevación de superficie de la superficie del fluido, expresada en unidades de longitud.
Caudal	Es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo.
Deflexión	Es la desviación de la dirección de la corriente del flujo.
Desnivel	Cambio de alturas en los líquidos.
Embalse	Es la acumulación de agua producida por una obstrucción en el lecho de una corriente de agua.
Empuje	Fuerza producida a un cuerpo por un fluido.

Fluido	Es una sustancia que se deforma continuamente, engloba líquidos y gases.
Flujo	Es el cuerpo que atraviesa una sección transversal.
Flujo Bidimensional	Es un flujo en que el vector velocidad sólo depende de dos variables.
Hormigón	Compuesto formado de aglomerantes, agregados, agua, aire y aditivos.
Piezómetro	Instrumentos utilizados para medir la presión del agua.
Tirante	Altura de la superficie libre que alcanza un fluido estático o dinámico.
Vena contraída	La sección que ha sufrido estrangulación en el paso del flujo.
Vertedero	Estructura hidráulica destinada a permitir el paso, libre o controlado, de un fluido.

RESUMEN

La investigación de los coeficientes de descarga, velocidad y contracción en medidores de flujo, como las compuertas de descarga en el fondo y los orificios circulares, ambos de pared delgada, definen ecuaciones únicas en estructuras hidráulicas que miden los volúmenes de fluidos.

Al inicio se detalla la clasificación, el principio hidráulico y las ecuaciones que determinan el caudal en la compuerta de fondo y en el orificio circular. Seguidamente la determinación de las ecuaciones experimentales para comparar con ecuaciones teóricas, para este análisis fue necesario considerar las condiciones físicas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, debido a que forma parte de la variación de los resultados.

En las ecuaciones encontradas para los dispositivos de medición se consideró el fenómeno de estrangulamiento en la salida del flujo, el que determina el volumen y la velocidad real que atraviesa la sección contraída de la estructura hidráulica.

Los valores encontrados en esta investigación siguen la tendencia de los resultados en procesos experimentales desarrollados por Knapp, Henderson, Cofré y Buchheister, que muestran factores de corrección para una descarga teórica, haciendo posible la comparación a través de su gráfica propuesta.

OBJETIVOS

General

Simular y analizar el comportamiento del flujo a través de compuertas y orificios circulares de pared delgada.

Específicos

1. Determinar los coeficientes de velocidad, contracción y descarga, para las ecuaciones de compuertas y orificios.
2. Comparar resultados teóricos con los obtenidos de forma práctica, mediante la realización de los ensayos de laboratorio.
3. Que el estudiante de los cursos de Hidráulica e Hidráulica de Canales visualice y conozca de forma física los distintos elementos que componen cada uno de los medidores de caudal a ensayar.
4. Representar gráficamente la variación de los valores de los coeficientes de velocidad, contracción y descarga en función del tirante aguas arriba y la abertura de la compuerta.
5. Evaluar la dependencia de los tirantes de agua inmediatos aguas abajo de la salida de la compuerta de fondo en función de la carga aguas arriba.

6. Implementar prácticas de laboratorio sobre medición de flujo en compuertas y orificios, y realizar un instructivo para prácticas de laboratorio en hidráulica.

INTRODUCCIÓN

Ya sea en campo o en laboratorio, la velocidad de flujo entre otras variables, proporciona datos fundamentales en que se basan el análisis y el diseño de las obras hidráulicas. La medición de los caudales constituye una parte esencial del control de análisis y de operación de los sistemas hidráulicos. Por lo general en un sistema de conducción se mide la proporción del uso del agua para los habitantes del municipio, su empleo en procesos industriales y uso agrícola, por mencionar algunas. También es preciso determinar la capacidad de las corrientes de agua y estructuras hidráulicas.

El estudio hidrológico de ríos se basa en el análisis estadístico de una larga secuencia de datos obtenidos por medidas continuas. Para esas diversas aplicaciones se han desarrollado en el transcurso de los años una multitud de dispositivos que brinda la descarga en función de variables como carga, presión, etc. Todos ellos se basan en las leyes físicas fundamentales de la mecánica de los fluidos.

Entre los medidores de flujo, específicamente para canales abiertos, están las compuertas con descarga en el fondo y los orificios circulares de pared delgada con descarga libre, que brinda valores de caudal aceptables en función de la carga hidráulica que existe sobre ellos.

1. MEDICIÓN DE CAUDALES EN COMPUERTAS Y ORIFICIOS

1.1. Compuertas

Una compuerta consiste en una placa móvil, plana o curva, que al levantarse permite medir el caudal que atraviesa un canal, presa, esclusa, obra de derivación y obras hidráulicas de gran envergadura, a la vez que regula la descarga producida.

1.1.1. Definición y uso

La compuerta tiene una abertura que generalmente se hace entre el piso de un canal y el borde inferior de la compuerta, por lo que su ancho coincide con el del canal; en estas condiciones el flujo puede considerarse bidimensional. El caudal de una compuerta y las características hidráulicas de su descarga se pueden conocer a partir de cualquier método de aforo.

Las diferentes formas de las compuertas dependen de su aplicación, el tipo de compuerta a utilizar dependerá principalmente del tamaño y forma de la abertura, de la carga estática, del espacio disponible, del mecanismo de apertura y de las condiciones particulares de operación. Algunos usos son:

- Control de flujo de agua
- Control de inundaciones
- Proyectos de irrigación
- Sistemas de drenaje
- Plantas de tratamiento

1.1.2. Clasificación

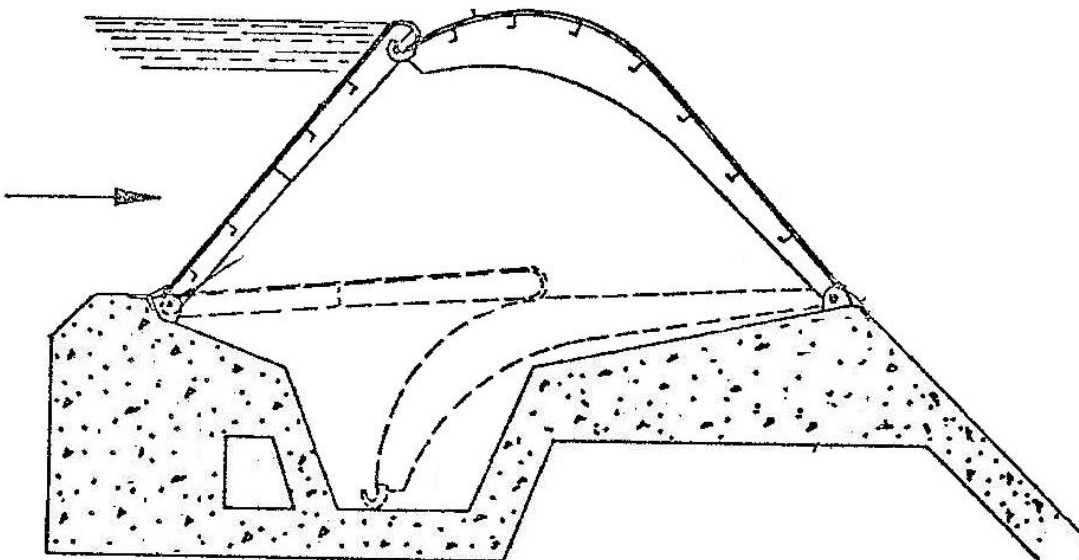
Las compuertas se clasifican según su uso para obras hidráulicas de gran envergadura, (canales, presas, esclusas, etcétera) y para tuberías.

Los principales tipos de compuertas de gran envergadura son:

- Compuerta tipo tejado

Es operada utilizando el desnivel de agua creado por éstas y no requiere de equipo mecánico para su operación.

Figura 1. **Compuerta tipo tejado**

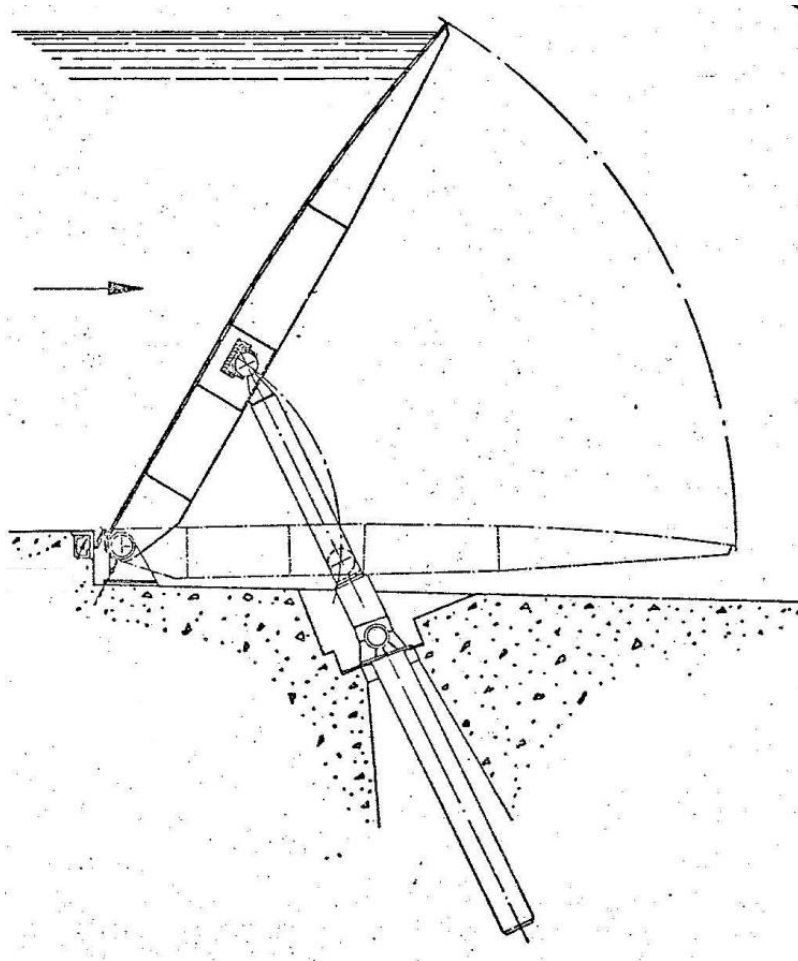


Fuente: GEYMET, Alfredo Bianco. Elaborada en un proceso constructivo.
<http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Alfredobi>. Consulta: 25 de junio de 2013.

- Compuerta basculante

Puede ser utilizada tanto en la cima del vertedero de una presa o instalada en el fondo de un río o canal.

Figura 2. **Compuerta basculante**

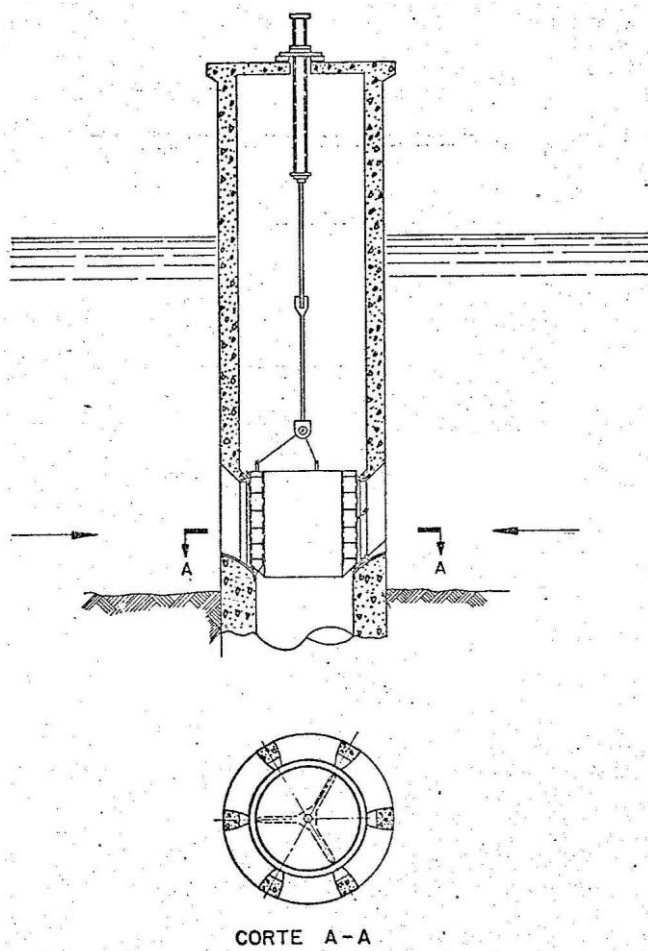


Fuente: GEYMET, Alfredo Bianco. Elaborada en un proceso constructivo.
<http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Alfredobi>. Consulta: 25 de junio de 2013.

- Compuerta tipo cilindro

Las compuertas cilíndricas se utilizan para descargas en presión, permitiendo la colocación de la sección de toma a cualquier profundidad, en un embalse. En el mismo pozo se pueden disponer tomas de agua a diversas alturas. Se acopla fácilmente a una tubería de salida.

Figura 3. **Compuerta cilíndrica**

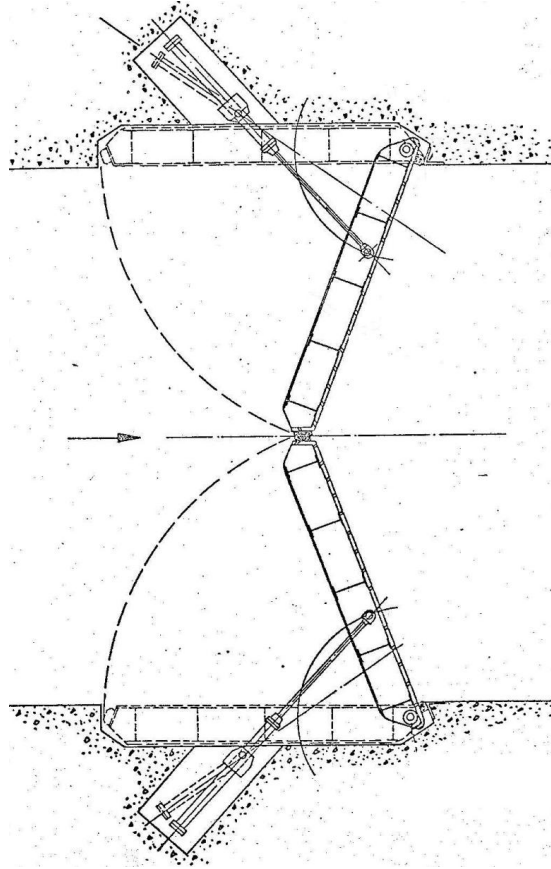


Fuente: GEYMET, Alfredo Bianco. Elaborada en un proceso constructivo.
<http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Alfredobi>. Consulta: 25 de junio de 2013.

- Compuerta tipo esclusa

Tienen bisagras verticales que se accionan por medios mecánicos o por pistones hidráulicos que permiten el paso de embarcaciones que deben atravesar una diferencia de niveles pronunciados.

Figura 4. **Compuerta tipo esclusa (vista de planta)**



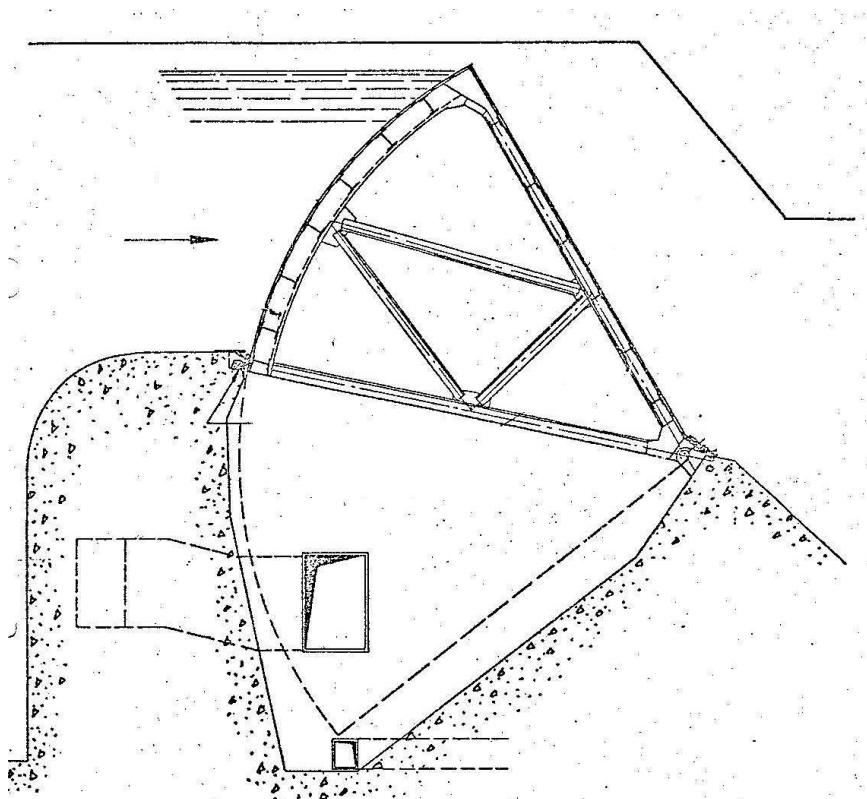
Fuente: GEYMET, Alfredo Bianco. Elaborada en un proceso constructivo.
<http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Alfredobi>. Consulta: 25 de junio de 2013.

- Compuerta tipo sector

Es una compuerta utilizada en vertederos y presas, es manipulada utilizando el desnivel de agua creado por éstas, no requiere de equipo mecánico para su operación.

La necesidad de contar con una cámara donde se abate la compuerta hace que el vertedero no pueda tener la forma adecuada, lo que incrementa el volumen de hormigón del mismo.

Figura 5. **Compuerta tipo sector**

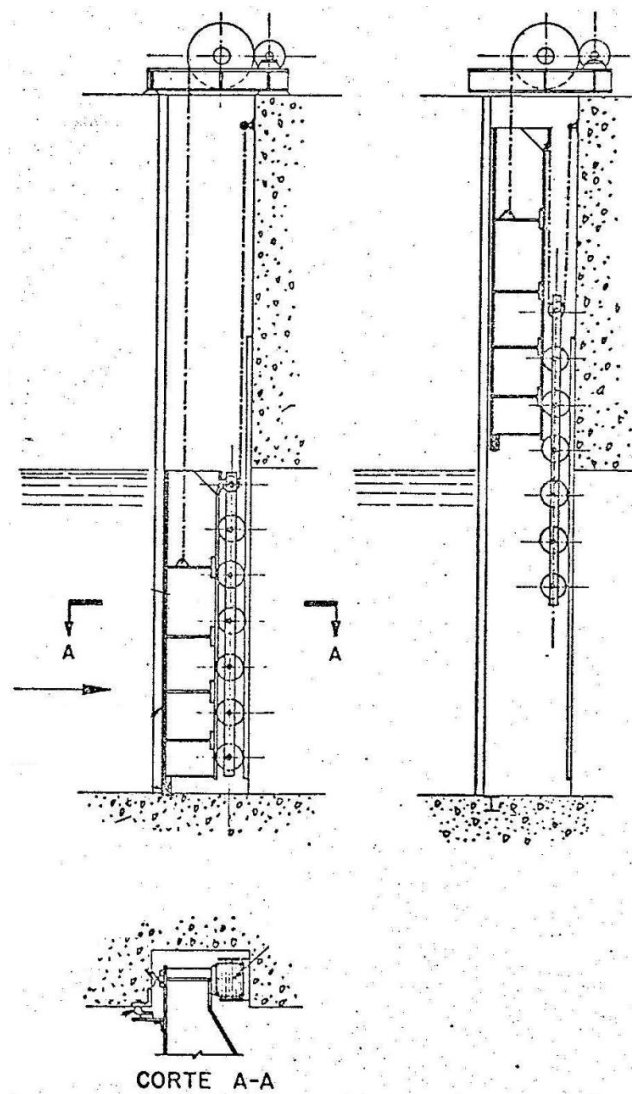


Fuente: GEYMET, Alfredo Bianco. Elaborada en un proceso constructivo.
<http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Alfredobi>. Consulta: 25 de junio de 2013.

- Compuerta tipo Stoney

Son utilizadas para tomas de presión para descargas de fondo o para la toma de una central hidroeléctrica.

Figura 6. **Compuerta tipo Stoney**

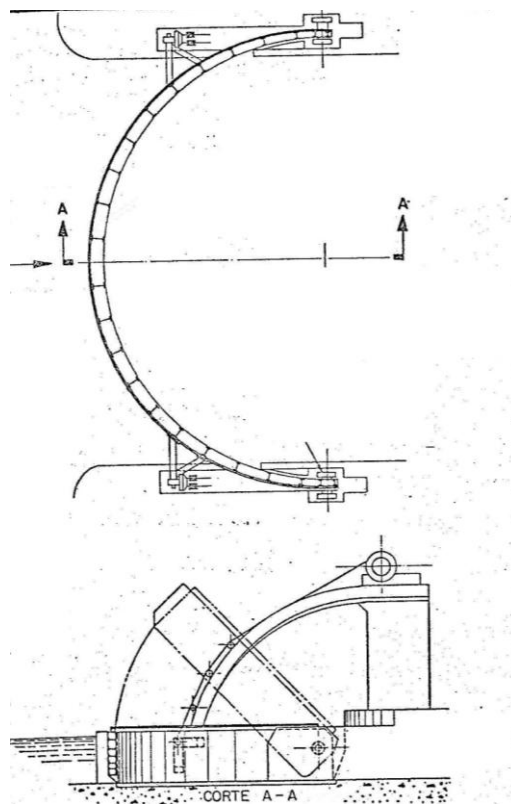


Fuente: GEYMET, Alfredo Bianco. Elaborada en un proceso constructivo.
<http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Alfredobi>. Consulta: 25 de junio de 2013.

- Compuerta tipo visera

Es utilizada en canales navegables. Es accionada por un pistón hidráulico o neumático.

Figura 7. **Compuerta tipo visera**

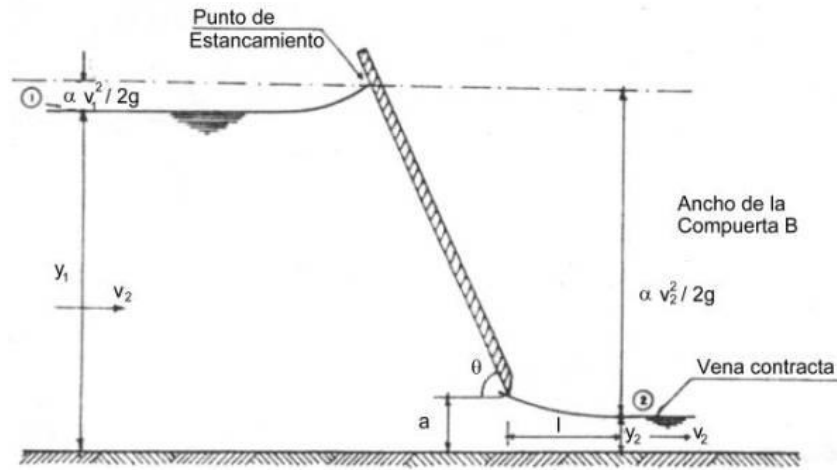


Fuente: GEYMET, Alfredo Bianco. Elaborada en un proceso constructivo.
<http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Alfredobi>. Consulta: 25 de junio de 2013.

- Compuerta plana

Son el tipo de compuertas que tienen propiedades hidráulicas cuando están bien calibradas, y pueden emplearse como medidores de flujo.

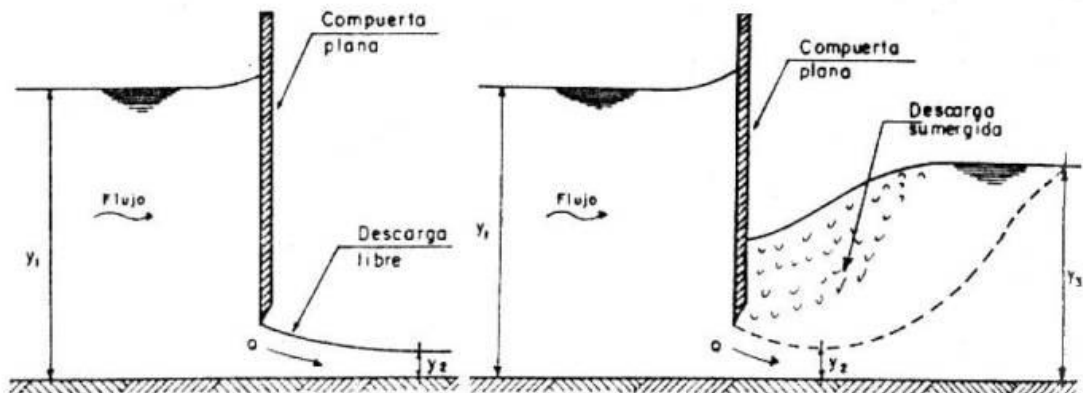
Figura 8. Compuerta plana



Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.213.

Las compuertas planas según su flujo aguas abajo se clasifican en descarga libre y descarga sumergida.

Figura 9. Compuerta con descarga libre y sumergida

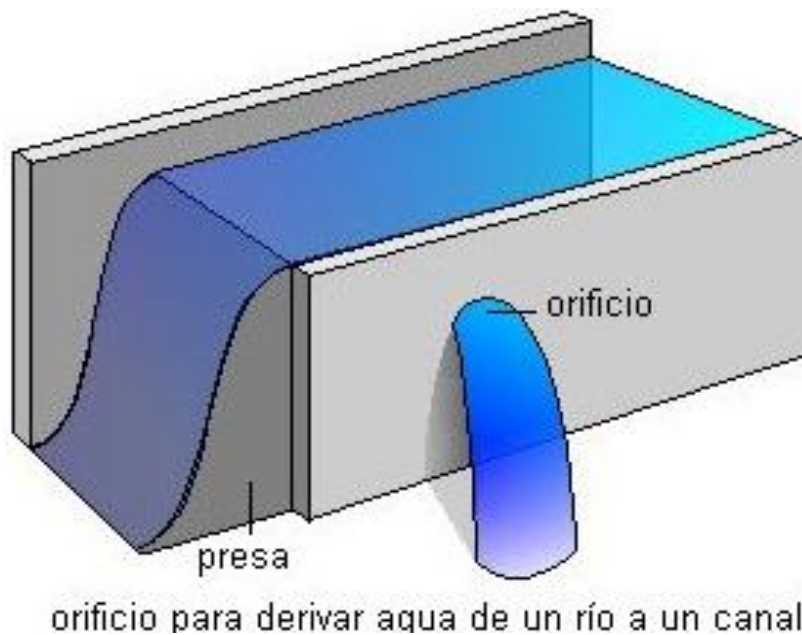


Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.213.

1.2. Orificios

Desde el punto de vista hidráulico, los orificios son perforaciones, generalmente de forma regular y perímetro cerrado, colocados por debajo de la superficie libre del agua en depósitos o almacenamientos, tanques, canales o tuberías.

Figura 10. Orificio para derivar agua

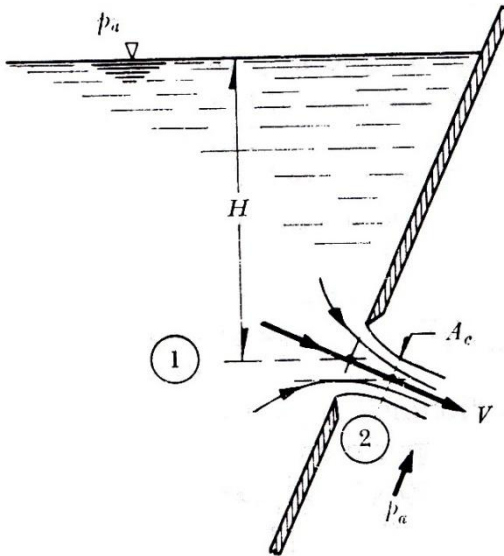


Fuente: VILLON, Máximo. Hidráulica de Canales. p.387.

1.2.1. Definición y uso

Considerar un recipiente lleno de un líquido, en cuya pared lateral se ha practicado un orificio de pequeñas dimensiones (en comparación con su profundidad desde la superficie libre del fluido hasta el centro del orificio) y cualquier forma (ver figura 11).

Figura 11. Orificio inclinado



Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.203.

La utilidad del orificio es descargar un caudal cuya magnitud se desea calcular, por lo cual se supone que el nivel del fluido en el recipiente permanece constante por efecto de la entrada de un caudal idéntico al que sale; o bien porque posea un volumen muy grande. Además, el único contacto entre el líquido y la pared debe ser una arista biselada; esto es, el orificio de pared delgada.

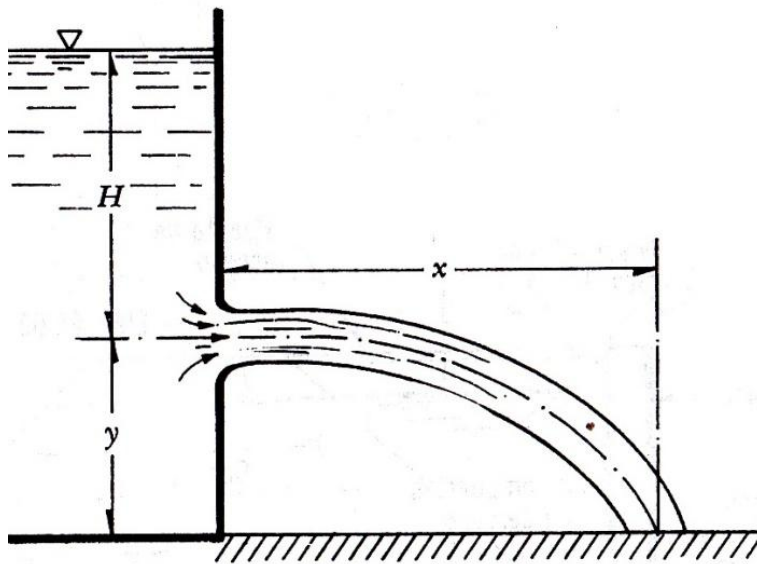
1.2.2. Clasificación de orificios

La clasificación puede realizarse de acuerdo a las condiciones de trabajo, es decir, descargando libremente, ahogados parcialmente o sumergidos o a presión en el interior de una tubería. De la misma manera la clasificación puede realizarse de acuerdo con su forma, circular, cuadrada, rectangular, etcétera.

1.2.2.1. Orificios con descarga libre

Son aquellos en los que el nivel de líquido de la descarga se encuentra por debajo del orificio.

Figura 12. Orificio con descarga libre



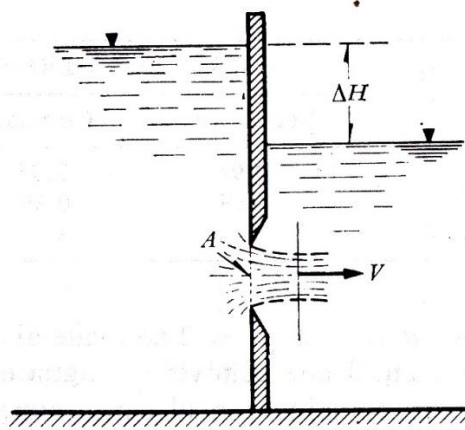
Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.233.

1.2.2.2. Orificios sumergidos o ahogados

Son aquellos en los que el nivel de líquido de la descarga se encuentra por encima y por debajo del orificio, pueden ser de dimensiones fijas o ajustables.

Los orificios sumergidos con dimensiones fijas se usan cuando la carga de líquido disponible es insuficiente para la operación adecuada de los vertederos, debido a que si la carga H es baja un vertedero no funciona.

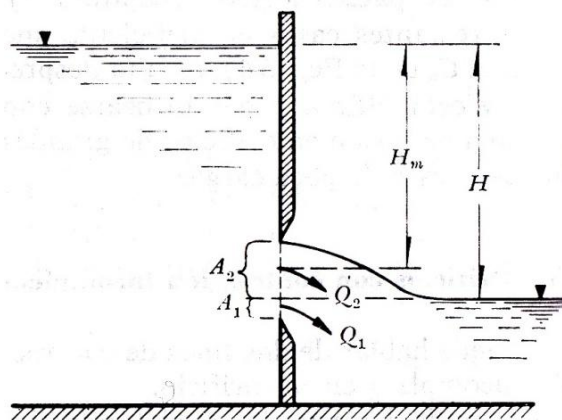
Figura 13. **Orificio sumergido totalmente**



Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.212.

Los orificios sumergidos ajustables son aquellos en los que el área de descarga puede modificarse a voluntad, con el fin de acomodar el área a los distintos caudales probables y/o necesarios.

Figura 14. **Orificio sumergido parcialmente**

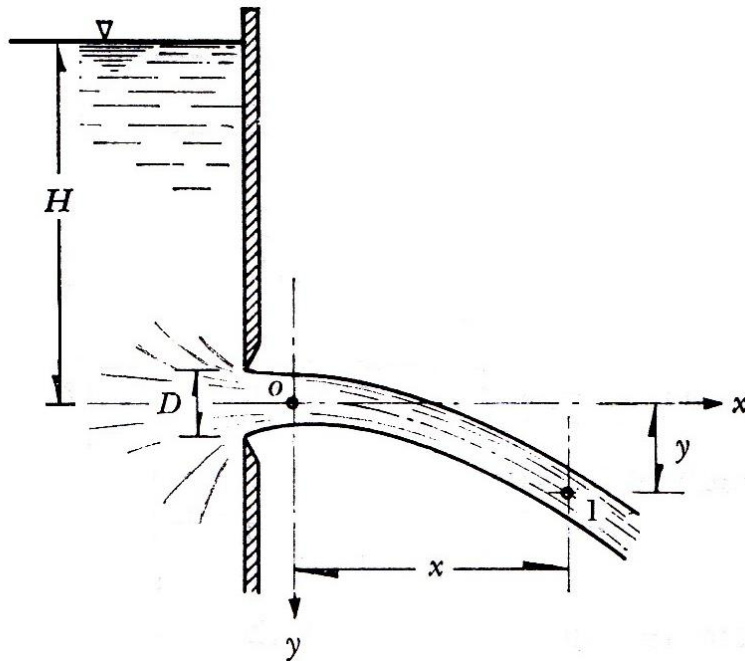


Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.212.

1.2.2.3. Orificios de pared delgada

En estos orificios el agua al salir tiene contacto con un solo punto y lo llena completamente. La vena líquida sufre una contracción, que llega a ser extrema en la parte que se denomina vena o sección contractada o contraída.

Figura 15. Orificio de pared delgada

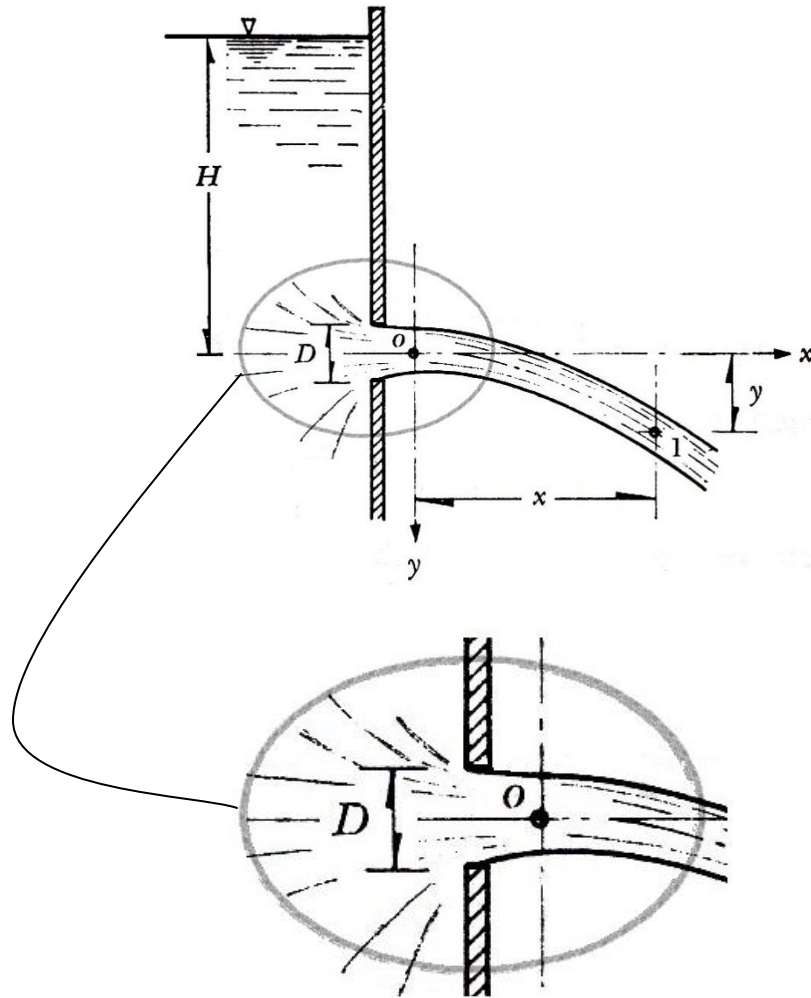


Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.209.

1.2.2.4. Orificios de pared gruesa

En estos orificios el agua al salir tiene contacto en más de un punto, se le puede dar forma abocinada para que al salir el agua se forme un chorro igual al diámetro del orificio.

Figura 16. Orificio de pared gruesa

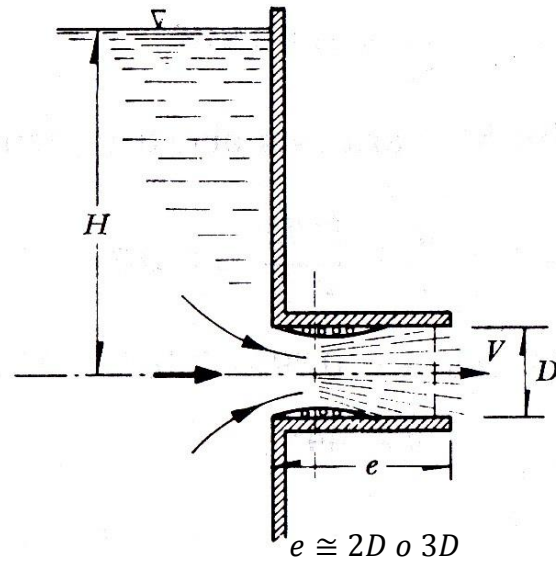


Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.209.

1.2.2.5. Orificio de tubo

La salida del orificio está conectada a un tubo corto, es decir, el líquido no sale a la superficie libre inmediatamente, sino a un tubo de pequeña longitud aproximadamente 2 o 3 veces el diámetro del orificio.

Figura 17. Orificio de tubo



Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.209.

2. PRINCIPIOS HIDRÁULICOS EN COMPUERTAS DE FONDO Y ORIFICIOS CIRCULARES DE PARED DELGADA

2.1. Compuertas de fondo

Es una estructura hidráulica que mide la cantidad de flujo que atraviesa un borde biselado en un área determinada, dicho flujo toca un punto en la compuerta.

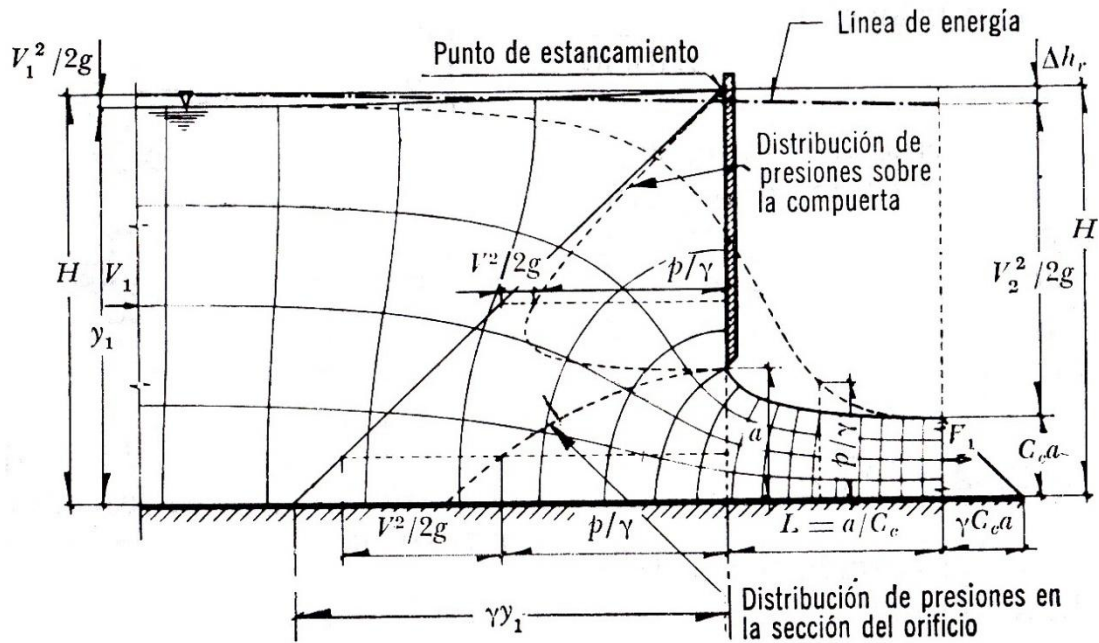
2.1.1. Funcionamiento hidráulico

La red de flujo de la compuerta plana, permite explicar con claridad la contracción que experimenta el chorro descargado por la abertura de altura a , hasta alcanzar un valor en una distancia L , en que las líneas de corriente se vuelven horizontales y tienen por ello una distribución hidrostática de presiones.

Debido al fenómeno de contracción y a la fricción con el piso, se produce una pérdida de carga Δh_r que influye en el cálculo del gasto. Asimismo, la carga $\frac{v_1^2}{2g}$ con que llega el agua en el canal, aguas arriba de la compuerta, tiene mayor importancia a medida que la relación $\frac{y_1}{a}$ disminuye.

En el canto inferior de la compuerta las líneas de corriente tienden a unirse y es ahí donde la velocidad adquiere su máximo valor. Debido a la curvatura de las líneas de corriente una gran presión actúa sobre la línea de intersección del plano de la compuerta, razón por la cual se tiene una velocidad pequeña.

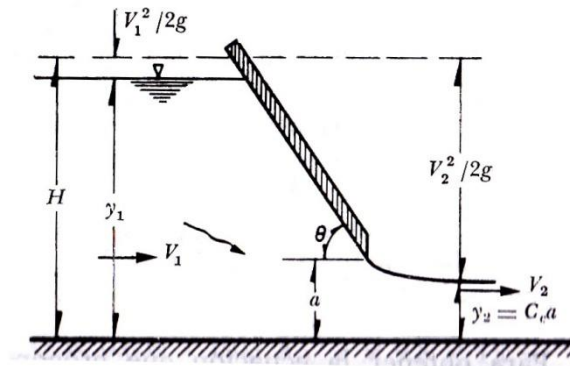
Figura 18. Red de flujo para una compuerta plana



Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.214.

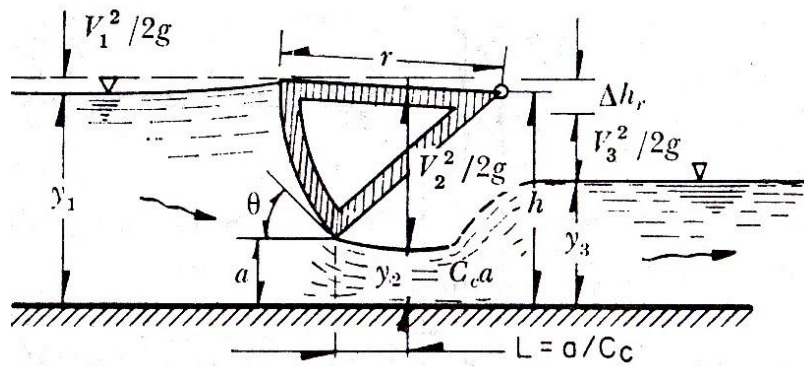
Para obtener la ecuación que proporcione el caudal, se considerará el caso más general de una compuerta plana, con una inclinación θ° respecto de la horizontal y un ancho b (ver figura 19). La inclinación θ° es equivalente a la tangente en el punto que toca el flujo en la compuerta radial (ver figura 20), y con $\theta = 90^\circ$ incluye el caso de la compuerta vertical (ver figura 21).

Figura 19. Compuerta plana inclinada



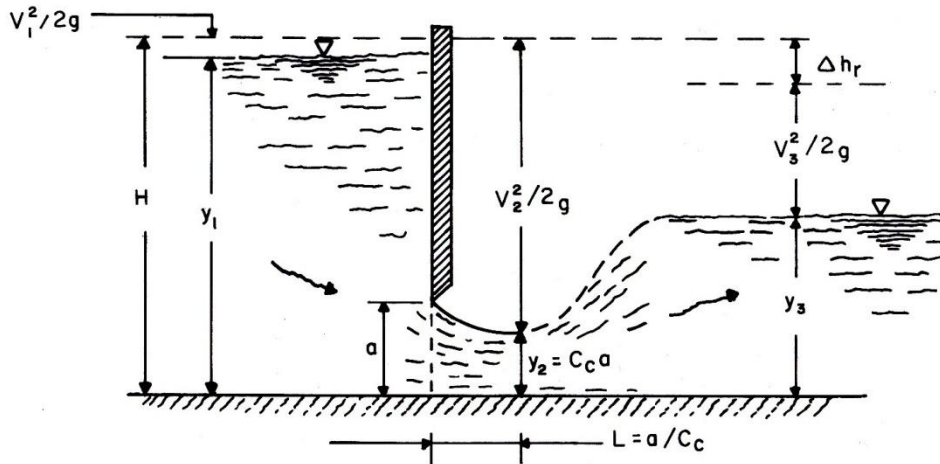
Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.214.

Figura 20. Compuerta radial



Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.213.

Figura 21. Compuerta plana vertical



Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.213.

En la figura 21, los elementos son:

$H = y_1 + \frac{V_1^2}{2g}$: carga total aguas arriba de la compuerta.

$\frac{V_1^2}{2g}$: carga de velocidad con que llega el agua en el canal, aguas arriba.

y_1 : tirante aguas arriba de la compuerta.

y_2 : tirante de la vena contraída aguas debajo de la compuerta ($C_c \times a$).

a : abertura de la compuerta.

b : ancho de la compuerta.

C_c : coeficiente de contracción.

$L = \frac{a}{C_c}$ longitud desde la compuerta hasta y_2 (sección contraída).

y_3 : tirante normal (si las condiciones lo permiten), aguas abajo.

Δh_r : pérdida de carga.

2.1.2. Ecuaciones de cálculo del caudal

Se establece la ecuación de energía entre la sección "1" (ver figura 21) antes de la compuerta y la sección contraída "2", a saber:

$$H = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Por otra parte de la ecuación de continuidad se tiene para un ancho constante:

$$V_1 = \frac{y_2}{y_1} V_2$$

Que sustituida en la ecuación anterior conduce a:

$$y_1 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 \frac{V_2^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Y de aquí tener que:

$$\frac{V_2^2}{2g} = \frac{y_1 - y_2}{1 - \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2} = \frac{\left(1 - \frac{y_2}{y_1}\right) y_1}{\left(1 + \frac{y_2}{y_1}\right) \left(1 - \frac{y_2}{y_1}\right)}$$

Por lo tanto, la velocidad media real en la sección contraída es:

$$V_2 = \frac{C_v}{\sqrt{1 + \frac{y_2}{y_1}}} \sqrt{2gy_1}$$

Donde C_v es el coeficiente de velocidad.

Para una sección rectangular, siendo el área $A=b \cdot a$, la ecuación para el cálculo del caudal de descarga por la compuerta es:

$$Q = C_d b a \sqrt{2gy_1}$$

Ecuación 2.1

Donde C_d es el coeficiente de descarga.

2.1.3. Coeficiente de contracción

Este coeficiente lo han obtenido experimentalmente muchos investigadores a través de la geometría del flujo.

Para determinar el coeficiente de contracción se pueden utilizar las siguientes ecuaciones:

$$C_c = \frac{a}{L}$$

Ecuación 2.2

$$C_c = \frac{1}{2} \frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v} \right)^2 + \sqrt{\left[\frac{1}{2} \frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{C_d}{C_v} \right)^2}$$

Ecuación 2.3

2.1.4. Coeficiente de velocidad

Los investigadores Knapp y Henderson exponen una comparación interesante de algunos resultados que presentan discrepancias importantes atribuibles, según Knapp, el grado de agudeza del canto afilado de la compuerta. Henderson, por el contrario, concluye que esto se debe a la manera como se desarrolla la capa límite a partir del plano de la compuerta.

Con base a las experiencias de estos dos reconocidos investigadores, Knapp propone una ecuación para calcular el coeficiente de velocidad en compuertas verticales con descarga libre, en función de la relación $\frac{a}{H}$. Para ser congruentes con los anteriores desarrollos, se ha modificado la ecuación para que la dependencia sea con $\frac{a}{y_1}$, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_v = 0,960 + 0,0979 \frac{a}{y_1}$$

Ecuación 2.4

Tiene como límite superior $C_v = 1$, el cual se alcanza para $\frac{a}{y_1} = 0,408$.

2.1.5. Coeficiente de descarga

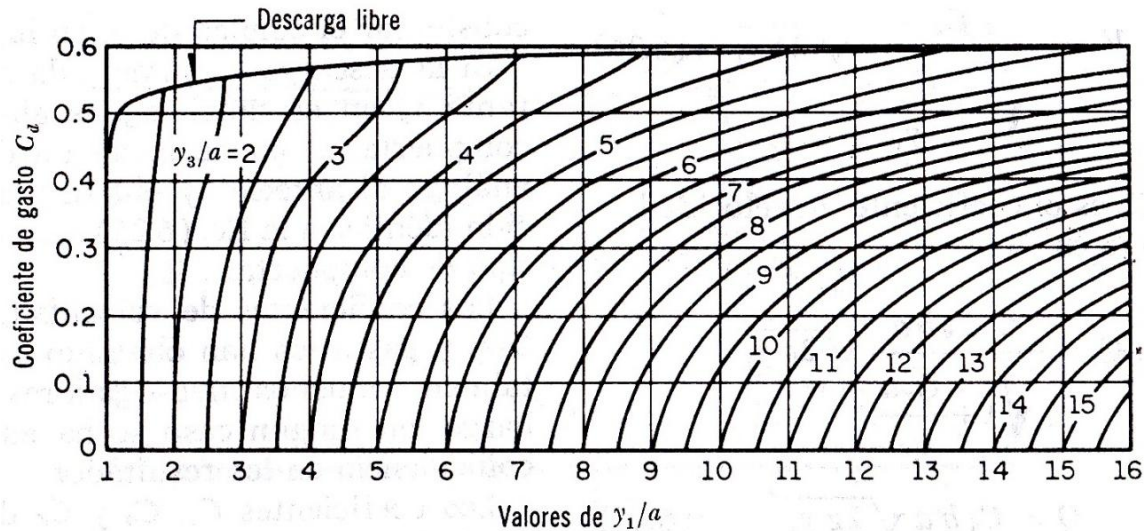
Para obtener el valor del caudal real del aforo en el flujo de compuertas planas el coeficiente de descarga se obtiene de la dependencia de los coeficientes anteriores, C_c y C_v en la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{C_c C_v}{\sqrt{1 + \frac{y_2}{y_1}}}$$

Ecuación 2.5

Por lo que respecta a este coeficiente, Cofré y Buchheister comprobaron y ampliaron los resultados obtenidos por Henry, en la cual describen en una sobre posición gráfica de la relación $\frac{y_1}{a}$ utilizada para descarga libre y la relación $\frac{y_3}{a}$ utilizada para descarga sumergida, como lo muestra la figura 22.

Figura 22. **Coefficiente de descarga según Cofré y Buchheister**



Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.216.

2.1.6. Límites de aplicación

Los límites dependieron de la geometría de las instalaciones en el canal, con que cuenta el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, ya que el ancho del canal es de 30 centímetros y la altura máxima del tirante y_1 para controlar el flujo en el tanque contenedor del aforo fue de 56 centímetros.

La condición mínima en la toma de caudales fue para una abertura de compuerta a de 2 centímetros y un tirante y_1 de 16,5 centímetros, con un tirante menor al mencionado el flujo en la compuerta resulta sumergido.

La condición máxima en la toma de caudales fue para una abertura de compuerta a de 14 centímetros y un tirante y_1 de 26 centímetros, con un tirante mayor al mencionado, el flujo alcanza volumen y velocidades muy altas que no permiten controlar el caudal en el aforo.

2.2. Orificios circulares de pared delgada

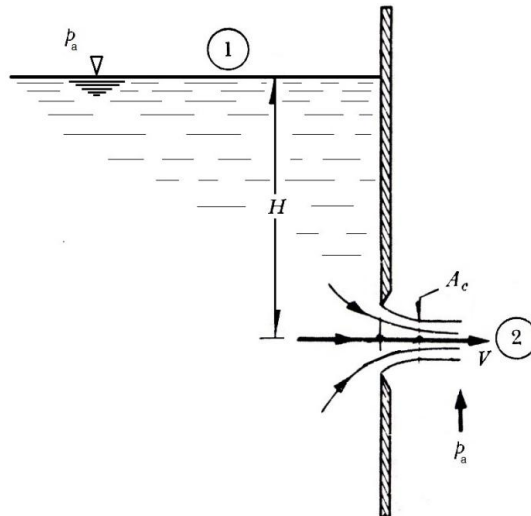
En estos orificios el agua al salir tiene contacto con un solo punto y lo llena completamente. La vena líquida sufre una contracción, que llega a ser extrema en la parte que se denomina vena o sección contractada o contraída.

2.2.1. Funcionamiento hidráulico

Al considerar un tanque lleno de un líquido, tal como se muestra en la figura 23, donde en una de sus paredes laterales se ha practicado un orificio de pequeñas dimensiones y con sección A , es posible desarrollar algunos análisis.

Si se supone que el nivel en el tanque permanece constante (por ejemplo el tanque es alimentado con un caudal igual o superior al evacuado por el orificio y dispone de un sistema de rebalse), entonces el orificio descarga un caudal teórico Q_t , constante, cuya magnitud se puede determinar al plantear la ecuación de Bernoulli entre la superficie libre y la sección más contraída del chorro.

Figura 23. Orificio de descarga libre y pared delgada



Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.203.

2.2.2. Ecuaciones de cálculo del caudal

Para el cálculo del caudal es necesario conocer el área de la sección contraída, que siempre se expresa en función del área del orificio. Al analizar las condiciones en la descarga se puede establecer que el orificio es de pared delgada y, por tanto, el único punto de contacto entre el líquido y la pared es alrededor de una arista afilada, tal como se muestra en la figura 23.

Las partículas en la proximidad del orificio se mueven aproximadamente en dirección al centro del mismo, de modo que por efecto de su inercia, el cambio de dirección brusca que sufren genera una contracción del chorro en la sección 2 (ver figura 23). Esta sección se denomina sección contraída y tiene entonces un área A_c inferior al área A del orificio.

En esta sección se puede establecer que la distribución de las velocidades es prácticamente uniforme y su valor medio es V . Como se mencionó, al plantear la ecuación de Bernoulli, tomando como nivel de referencia una línea que pase por el centro de gravedad del orificio y considerando que la velocidad del agua en el tanque es despreciable, se puede obtener la siguiente expresión:

$$H + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

$$H = \frac{V_2^2}{2g}$$

Es importante anotar que en el caso que el orificio se encuentre sobre una pared inclinada se ha despreciado la diferencia de alturas entre el centro de gravedad de orificio y el centro de gravedad de la sección contraída. Despejando de la expresión anterior la velocidad, se obtiene que:

$$V_2 = \sqrt{2gH}$$

Expresión denominada de Torricelli, que indica que la velocidad sigue una ley parabólica con la carga H .

Este valor de la carga se toma al centro de gravedad del orificio, a pesar de que las partículas que se mueven sobre la parte superior de este punto tienen velocidades mayores que las partículas que se mueven por la parte inferior.

La hipótesis planteada para el valor de H tendrá mayor validez en la medida en que la dimensión del orificio en la dirección de H sea mucho menor que este valor.

Finalmente el caudal se puede expresar como:

$$Q_r = C_d A \sqrt{2gH}$$

Ecuación 2.6

Donde:

Q_r : caudal real.

C_d : coeficiente de descarga.

A : área del orificio.

g : aceleración de la gravedad.

H : altura entre la superficie libre y el centro de gravedad del orificio.

2.2.3. Coeficiente de contracción

Se denomina coeficiente de contracción a la relación entre el área de la vena contracta y el área del orificio (ver figura 24).

$$C_c = \frac{A_c}{A}$$

Ecuación 2.7

Donde:

C_c : coeficiente de contracción.

A_c : área de la sección contraída.

A : área del orificio.

2.2.4. Coeficiente de velocidad

Se le llama coeficiente de velocidad a la relación entre la velocidad real y la velocidad teórica.

$$C_v = \frac{V_r}{V_t}$$

Donde:

C_v : coeficiente de velocidad.

V_r : velocidad real.

V_t : velocidad teórica.

La velocidad teórica es $V_t = V = \sqrt{2gH}$ para llegar a la ecuación:

$$C_v = \frac{V_r}{\sqrt{2gH}}$$

Ecuación 2.8

El caudal real Q_r descargado en la sección contraída A_c será igual a la velocidad en la sección contraída por su área correspondiente, es decir:

$$Q_r = V_r A_c$$

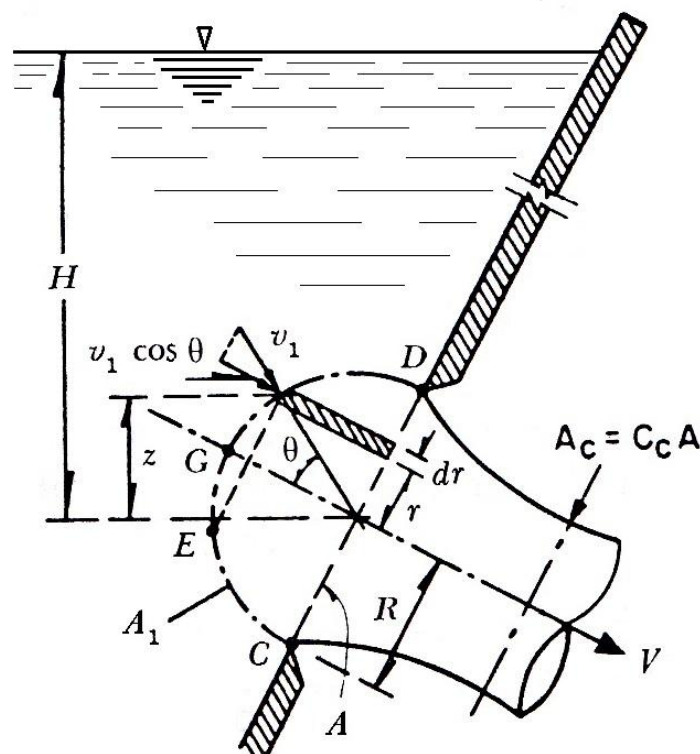
2.2.5. Coeficiente de descarga

Es la relación entre el caudal real, que se mide a través del aforo volumétrico y el caudal teórico, que se define por el área del orificio y la velocidad teórica descrita en la ecuación 2.9. También es posible describir este coeficiente como el producto del coeficiente de contracción y el coeficiente de velocidad (ecuación 2.10).

Es posible encontrar la magnitud del coeficiente de descarga para un orificio circular a partir de la ecuación de la cantidad de movimiento aplicada sobre un volumen de control limitado por la frontera del chorro en contacto con el aire, la sección contraída y, dentro del recipiente, por una superficie semiesférica de radio igual al del orificio. Para hacer lo anterior, se designa como V_1 la velocidad de una partícula sobre la semiesfera de radio R , cuya dirección es radial al centro de la semiesfera (ver figura 24).

La superficie de la semiesfera vale $A_1 = 2\pi R^2$ y la correspondiente a la sección contraída $A_c = C_c A = C_c \pi R^2$.

Figura 24. **Derivación del coeficiente de descarga**



Fuente: SOTELO, Gilberto. Hidráulica general. p.205.

Finalmente el coeficiente de descarga se expresa como:

$$C_d = \frac{Q_r}{A\sqrt{2gH}}$$

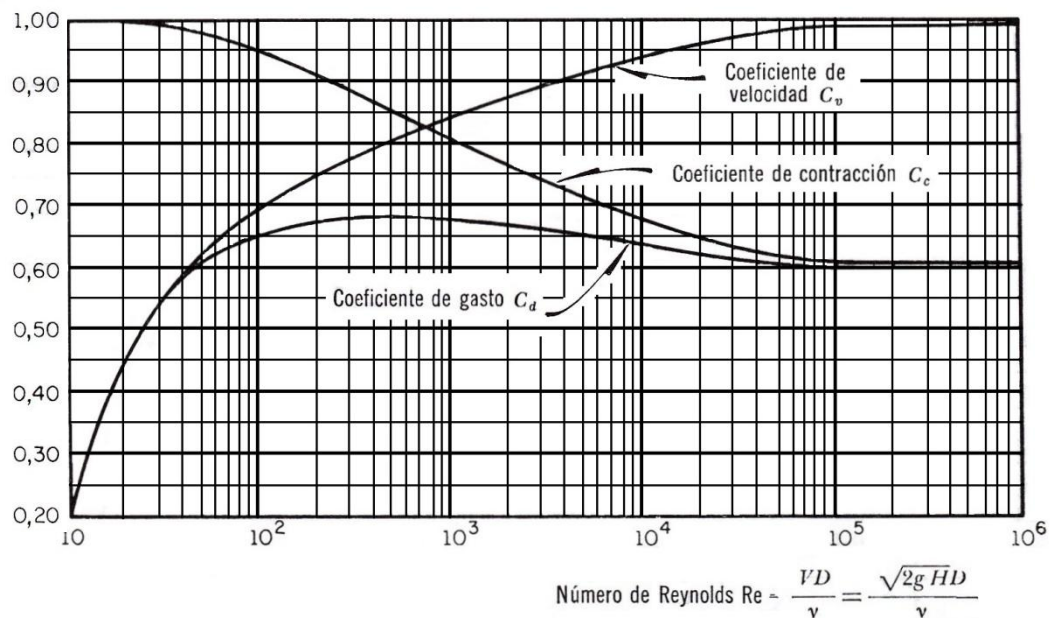
Ecuación 2.9

$$C_d = C_c C_v$$

Ecuación 2.10

Los coeficientes de descarga, velocidad y contracción para los orificios circulares de pared delgada también pueden ser determinados a través del número de Reynolds, como lo muestra la figura 25.

Figura 25. **Variación de los coeficientes de velocidad, contracción y gasto con el número de Reynolds**



Fuente: RODRIGUEZ DÍAZ, Hector Alfonso. Hidráulica experimental. p.112.

2.2.6. Límites de aplicación

Los límites dependieron de la geometría de las instalaciones en el canal, con que cuenta el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, ya que el ancho del canal es de 30 centímetros y la altura máxima del tirante y_1 para controlar el flujo en el tanque contenedor del aforo fue de 56 centímetros.

La condición mínima en la toma de caudales para el orificio de 5 centímetros de diámetro fue un tirante H de 6,5 centímetros, con un tirante menor al mencionado el flujo en el orificio resulta sumergido o inaceptable por no llenar la sección total del orificio.

La condición máxima en la toma de caudales fue para el orificio de 15 centímetros de diámetro y un tirante H de 33,5 centímetros, con un tirante mayor al mencionado, el flujo alcanza volumen y velocidades muy altas que no permiten controlar el caudal en el aforo.

3. ENSAYO DE COMPUERTAS DE FONDO Y ORIFICIOS CON DESCARGA LIBRE

3.1. Criterios para el dimensionamiento de los diámetros del orificio y tamaño de la compuerta

Debido a que los únicos datos conocidos son los realizados en compuertas, el dimensionamiento se obtiene de identificar las limitaciones en la medición de flujo en el canal; las cuales son: el tirante máximo y_1 (ver figura 21) y el caudal que pueda controlarse en el tanque recolector del aforo.

Para conocer el diámetro de los orificios que aceptan las condiciones anteriores; se determina que el tirante $y_1 = 26$ centímetros provoca un caudal de $Q_r = 0,05194 \frac{m^3}{s}$, si se supera el tirante $y_1 = 26$ centímetros provocaría un caudal que no es posible controlar en el tanque recolector del aforo.

Acudir a la ecuación del caudal real en orificios circulares de pared delgada dada por $Q_r = C_d A \sqrt{2gH}$, donde H será representada por y_1 , en este caso, A es el área del orificio de donde se desconoce el diámetro y $C_d = 0,6$ el coeficiente de descarga teórico (ver figura 22):

Sustituyendo se tiene:

$$Q_r = 0,6 \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \sqrt{2gy_1}$$
$$0,05194 \frac{m^3}{s} = 0,6 \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \sqrt{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2} \right) (0,26m)}$$

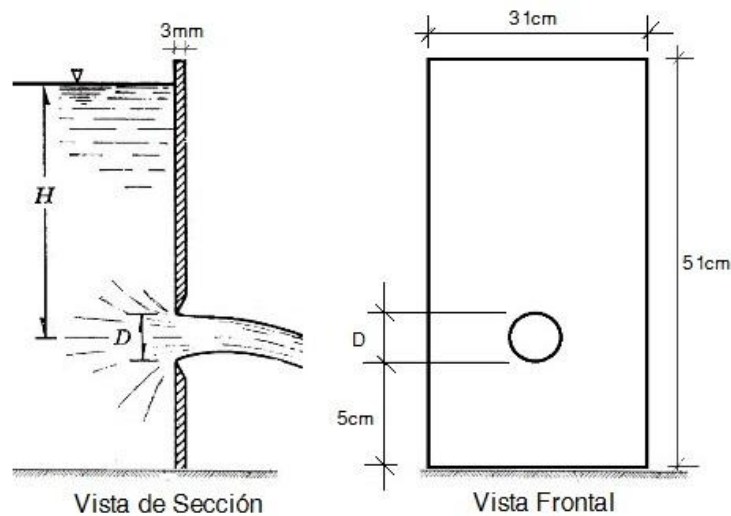
$$0,05194 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = (1,0643D^2) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\sqrt{0,0488\text{m}^2} = D = 0,2209\text{m}$$

Entonces el orificio puede ser de un diámetro de 22 centímetros, ya que las limitaciones fueron tomadas en cuenta. Tomar un orificio de mayor diámetro haría que no se pueda medir el volumen de agua.

Para el ensayo de esta investigación, se construyeron tres compuertas con orificios de diámetros menores al calculado, 15, 10 y 5 centímetros.

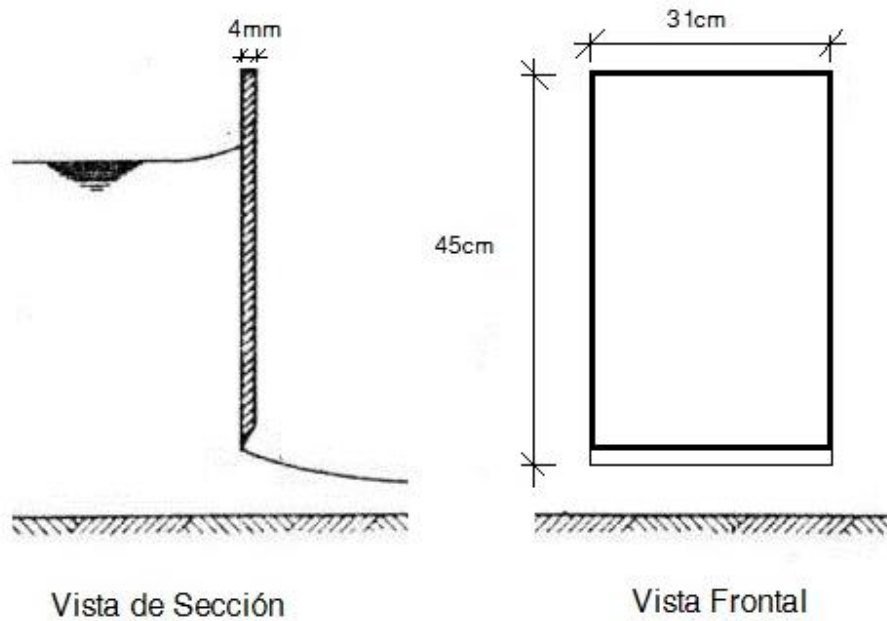
Figura 26. Dimensiones de los orificios



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

Las dimensiones en la compuerta están limitadas por la altura del canal antes de la compuerta, (50 centímetros), el ancho del canal (31 centímetros) y el espesor de la ranura que garantiza la verticalidad de la compuerta (0,5 centímetros).

Figura 27. Dimensiones de la compuerta



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

3.2. Material de construcción

El material de la compuerta debe ser de un material lo suficientemente fuerte para soportar el empuje que genera la velocidad del flujo en el borde inferior, que debe estar biselado para cumplir con que sean mediciones en pared delgada (ver figura 27). Debido a los requerimientos se propone una compuerta de aluminio, de 45 centímetros de alto, 31 centímetros de ancho y 0,4 centímetros de espesor.

El material en los orificios debe ser uno que garantice que no existirán deflexiones que hagan que cambie la geometría de un círculo a un ovoide. De manera que se proponen orificios de acrílico, de un espesor de 3 milímetros, altura de 51 centímetros, ancho de 31 centímetros y perforaciones circulares de 5, 10 y 15 centímetros de diámetro, a 5 centímetros del borde inferior de la compuerta, para tener el mayor número de variantes en el tirante H .

3.3. Procedimiento experimental (método de aforo volumétrico)

Las estructuras hidráulicas instaladas, calibradas y en buenas condiciones físicas, garantizan la fiabilidad de los valores obtenidos en la práctica de laboratorio, y el equipo para el desarrollo del ensayo está conformado por:

- Tanque metálico de sección transversal constante. El tanque dispone de un sistema de alimentación por medio de una bomba que succiona el volumen de agua, que a su vez puede ser regulado por una compuerta.
- Un canal de sección transversal constante, que tiene paredes de acrílico que facilita medir los tirantes, y piso de lámina metálica.
- Tanque volumétrico para el aforo de caudales, pudiendo medir el volumen a través de un piezómetro exterior.
- Cronómetro para medir el tiempo de llenado en el tanque volumétrico con el piezómetro.

Procedimiento de toma de datos para la compuerta de fondo:

- Determinar la abertura a entre la compuerta y el canal.

- Regular el tirante y_1 antes de la compuerta, de manera que sea constante.
- Ocasionar un flujo con descarga libre.
- Medir el tiempo, en segundos, de llenado del tanque recolector.

Procedimiento de toma de datos para los orificios:

- Determinar el diámetro del orificio.
- Regular el tirante y_1 antes del orificio, de manera que sea constante.
- Ocasionar un flujo con descarga libre.
- Medir el tiempo, en segundos, de llenado del tanque recolector.

3.4. Ensayo de compuerta

La medición de caudales se obtiene a través del aforo volumétrico, variando la abertura del flujo a cada 2 centímetros, medidos desde el fondo del canal hacia el borde biselado de la compuerta.

3.4.1. Datos obtenidos

Para considerar válido el aforo volumétrico, se propone una diferencia entre el caudal 1 y el caudal 2 menor a 0,15 litros por segundo medidos en el tanque con el piezómetro en el exterior.

Tabla I. **Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 2 cm**

No	Altura "y ₁ " (cm)	Tiempo 1 (s)	Vol 1 (l)	Caudal "Q ₁ " (l/s)	Tiempo 2 (s)	Vol 2 (l)	Caudal "Q ₂ " (l/s)	Error (<0,15)
0	16,5	Ahogado	-	-	-	-	-	-
1	17,00	42,79	295,86	6,9142	51,72	356,67	6,8962	0,0180
2	20,50	48,69	372,73	7,6552	49,78	380,79	7,6495	0,0057
3	23,00	48,53	400,62	8,2551	50,28	410,20	8,1583	0,0967
4	26,00	40,00	342,84	8,5710	46,15	397,68	8,6171	0,0461
5	29,00	32,69	300,89	9,2043	40,06	369,81	9,2314	0,0271
6	31,50	35,41	343,56	9,7023	43,07	416,84	9,6782	0,0241
7	38,50	46,34	488,32	10,5378	37,38	402,83	10,4958	0,0400
8	41,00	42,06	468,85	11,1472	35,34	394,00	11,1488	0,0016
9	44,00	36,50	416,84	11,4207	35,15	402,83	11,4603	0,0390
10	47,20	39,34	472,59	12,0130	35,12	419,80	11,9533	0,0597
11	50,00	26,34	327,6	12,4373	27,66	344,29	12,4472	0,0099
12	53,00	27,13	347,2	12,7976	31,97	406,51	12,7153	0,0823
13	56,00	31,00	406,51	13,1132	32,91	436,09	13,2509	0,1189

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 4 cm**

No	Altura "y ₁ " (cm)	Tiempo 1 (s)	Vol 1 (l)	Caudal "Q ₁ " (l/s)	Tiempo 2 (s)	Vol 2 (l)	Caudal "Q ₂ " (l/s)	Error (<0,15)
1	17	34,97	447,24	12,7892	34,59	443,52	12,8222	0,0330
2	20	33,06	465,12	14,0689	30,69	433,13	14,1131	0,0441
3	23	28,59	441,29	15,4351	32,03	495,08	15,4568	0,0217
4	26	26,03	427,20	16,4118	26,04	430,90	16,5476	0,1358
5	29	30,72	531,29	17,2946	24,75	431,64	17,4400	0,1454
6	32	23,97	439,80	18,3479	23,59	430,16	18,2348	0,1100
7	38	22,85	476,33	20,8460	21,84	452,45	20,7165	0,1200
8	42	20,03	429,42	21,4388	21,88	469,60	21,4625	0,0230
9	45	18,81	413,89	22,0037	21,03	465,06	22,1526	0,1489

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 6 cm**

No	Altura "y1" (cm)	Tiempo 1 (s)	Vol 1 (l)	Caudal "Q1" (l/s)	Tiempo 2 (s)	Vol 2 (l)	Caudal "Q2" (l/s)	Error (<0,15)
0	17	Ahogado	-	-	-	-	-	-
1	20	21,68	438,32	20,2177	24,69	496,58	20,1125	0,1052
2	23	21,03	467,36	22,2235	20,94	465,87	22,2479	0,0244
3	26	18,68	446,49	23,9020	20,00	475,58	23,7790	0,1230
4	29	18,19	461,39	25,3650	18,56	468,11	25,2214	0,1436
5	32	17,53	464,37	26,4900	17,47	461,39	26,4104	0,0796
6	38	15,41	445,01	28,8780	14,96	433,13	28,9525	0,0745
7	41	No controlado	-	-	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 8 cm**

No	Altura "y1" (cm)	Tiempo 1 (s)	Vol 1 (l)	Caudal "Q1" (l/s)	Tiempo 2 (s)	Vol 2 (l)	Caudal "Q2" (l/s)	Error (<0,15)
0	16	Ahogado	-	-	-	-	-	-
1	19	18,37	463,63	25,2384	18,56	468,85	25,2613	0,0229
2	22	17,25	483,82	28,0475	16,34	457,66	28,0086	0,0389
3	25	16,96	514,66	30,3455	14,25	432,39	30,3431	0,0024
4	28	14,54	469,6	32,2971	14,4	462,88	32,1444	0,1527
5	31	12,81	440,55	34,3911	12,59	432,39	34,3439	0,0472

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 10 cm**

No	Altura "y ₁ " (cm)	Tiempo 1 (s)	Vol 1 (l)	Caudal "Q ₁ " (l/s)	Tiempo 2 (s)	Vol 2 (l)	Caudal "Q ₂ " (l/s)	Error (<0,15)
0	18	Ahogado	-	-	-	-	-	-
1	21	12,97	427,2	32,9375	14,03	462,13	32,9387	0,0012
2	24	12	436,84	36,4033	12,85	466,61	36,3121	0,0912
3	27	10,5	402,83	38,3648	11,44	439,8	38,4440	0,0792
4	30	11,5	469,6	40,8348	11,5	470,35	40,9000	0,0652

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 12 cm**

No	Altura "y ₁ " (cm)	Tiempo 1 (s)	Vol 1 (l)	Caudal "Q ₁ " (l/s)	Tiempo 2 (s)	Vol 2 (l)	Caudal "Q ₂ " (l/s)	Error (<0,15)
0	19	Ahogado	-	-	-	-	-	-
1	22	11,97	458,41	38,2966	11,93	456,17	38,2372	0,0594
2	25	11,47	497,33	43,3592	10,09	436,84	43,2944	0,0648
3	28	8,1	382,99	47,2827	7,72	365,42	47,3342	0,0515

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Datos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 14 cm**

No	Altura "y ₁ " (cm)	Tiempo 1 (s)	Vol 1 (l)	Caudal "Q ₁ " (l/s)	Tiempo 2 (s)	Vol 2 (l)	Caudal "Q ₂ " (l/s)	Error (<0,15)
0	22	Ahogado	-	-	-	-	-	-
1	23	7,34	321,09	43,7452	7,44	326,16	43,8387	0,0935
2	24	7,54	354,48	47,0133	8,54	400,62	46,9110	0,1023
3	25	7,31	358,85	49,0902	8,25	405,78	49,1854	0,0952
4	26	7,65	397,68	51,9843	8,56	444,26	51,8995	0,0848

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Cálculos y resultados

El caudal real promedio se obtiene del caudal 1 y caudal 2; la velocidad media se obtiene de $V_{media} = \sqrt{2gy_1}$ y los coeficientes de descarga, velocidad y contracción de las ecuaciones 2.1, 2.4 y 2.3, respectivamente.

Tabla VIII. Cálculos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 2 cm

No	Qreal promedio (l/s)	Vmedia (cm/s)	Qteórico (l/s)	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental
1	6,9052	182,63	11,32	0,610	0,972	0,651
2	7,6524	200,55	12,43	0,615	0,970	0,655
3	8,2067	212,43	13,17	0,623	0,969	0,662
4	8,5941	225,86	14,00	0,614	0,968	0,650
5	9,2179	238,53	14,79	0,623	0,967	0,659
6	9,6903	248,60	15,41	0,629	0,966	0,664
7	10,5168	274,84	17,04	0,617	0,965	0,650
8	11,1480	283,62	17,58	0,634	0,965	0,668
9	11,4405	293,82	18,22	0,628	0,964	0,661
10	11,9832	304,31	18,87	0,635	0,964	0,668
11	12,4423	313,21	19,42	0,641	0,964	0,674
12	12,7565	322,47	19,99	0,638	0,964	0,670
13	13,1821	331,47	20,55	0,641	0,963	0,674

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Cálculos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 4 cm**

No	Qreal promedio (l/s)	Vmedia (cm/s)	Qteórico (l/s)	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental
1	12,8057	182,63	22,65	0,565	0,983	0,615
2	14,0910	198,09	24,56	0,574	0,980	0,621
3	15,4460	212,43	26,34	0,586	0,977	0,632
4	16,4797	225,86	28,01	0,588	0,975	0,632
5	17,3673	238,53	29,58	0,587	0,974	0,629
6	18,2914	250,57	31,07	0,589	0,972	0,629
7	20,7813	273,05	33,86	0,614	0,970	0,654
8	21,4507	287,06	35,60	0,603	0,969	0,640
9	22,0782	297,14	36,84	0,599	0,969	0,636

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Cálculos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 6 cm**

No	Qreal promedio (l/s)	Vmedia (cm/s)	Qteórico (l/s)	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental
1	20,1651	198,09	36,84	0,547	0,989	0,601
2	22,2357	212,43	39,51	0,563	0,986	0,615
3	23,8405	225,86	42,01	0,568	0,983	0,617
4	25,2932	238,53	44,37	0,570	0,980	0,618
5	26,4502	250,57	46,61	0,568	0,978	0,612
6	28,9153	273,05	50,79	0,569	0,975	0,611

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Cálculos obtenidos para compuerta con abertura “a” de 8 cm**

No	Qreal promedio (l/s)	Vmedia (cm/s)	Qteórico (l/s)	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental
1	25,2499	193,08	47,88	0,527	1,001	0,588
2	28,0281	207,76	51,52	0,544	0,996	0,603
3	30,3443	221,47	54,93	0,552	0,991	0,609
4	32,2208	234,38	58,13	0,554	0,988	0,608
5	34,3675	246,62	61,16	0,562	0,985	0,614

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Cálculos obtenidos para compuerta de abertura “a” 10 cm**

No	Qreal promedio (l/s)	Vmedia (cm/s)	Qteórico (l/s)	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental
1	32,9381	202,98	62,92	0,523	1,007	0,588
2	36,3577	217,00	67,27	0,540	1,001	0,604
3	38,4044	230,16	71,35	0,538	0,996	0,597
4	40,8674	242,61	75,21	0,543	0,993	0,600

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Cálculos obtenidos para compuerta de abertura “a” 12 cm**

No	Qreal promedio (l/s)	Vmedia (cm/s)	Qteórico (l/s)	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental
1	38,2669	207,76	77,29	0,495	1,013	0,558
2	43,3268	221,47	82,39	0,526	1,007	0,592
3	47,3085	234,38	87,19	0,543	1,002	0,608

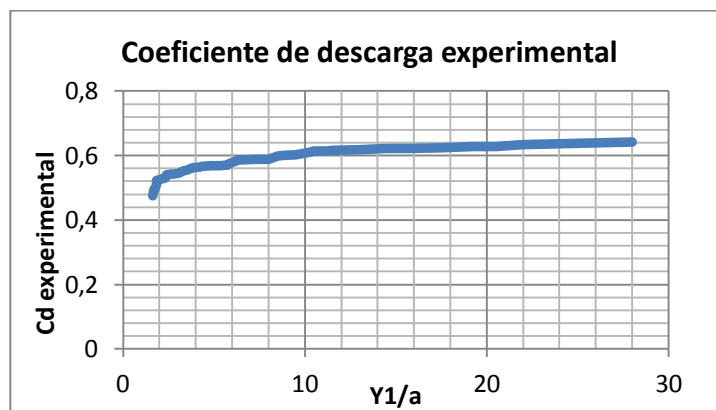
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Cálculos obtenidos para compuerta de abertura “a” 14 cm**

No	Qreal promedio (l/s)	Vmedia (cm/s)	Qteórico (l/s)	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental
1	43,7920	212,43	92,19	0,475	1,020	0,537
2	46,9622	217,00	94,18	0,499	1,017	0,565
3	49,1378	221,47	96,12	0,511	1,015	0,580
4	51,9419	225,86	98,02	0,530	1,013	0,602

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Coefficiente de descarga experimental**

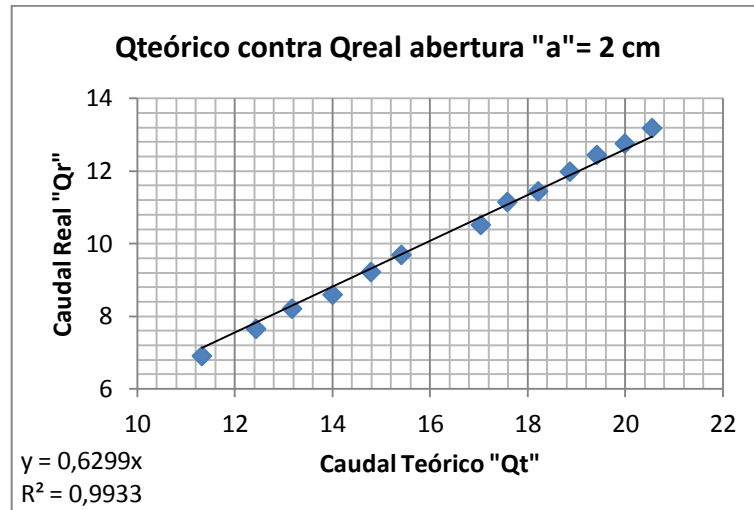


Fuente: elaboración propia.

3.4.3. Gráficas

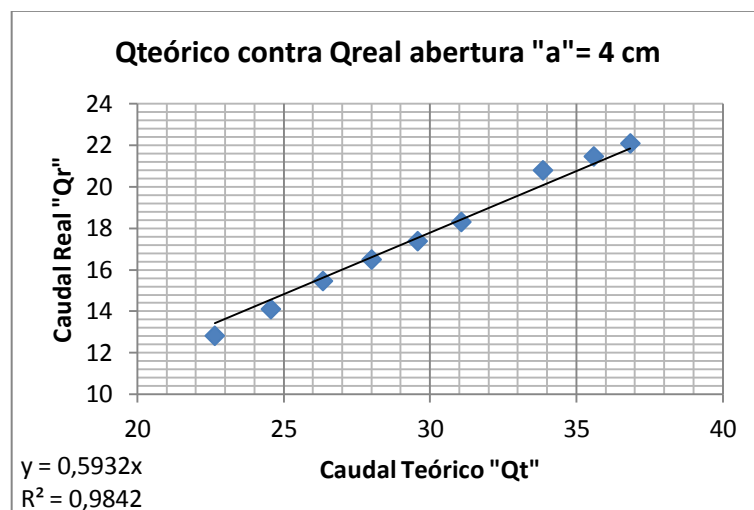
En las gráficas se determina la ecuación que genera la recta y el porcentaje de error en la variación de los puntos, para verificar la tendencia lineal en la comparación del caudal real y caudal teórico.

Figura 29. Caudal real contra caudal teórico a= 2 cm



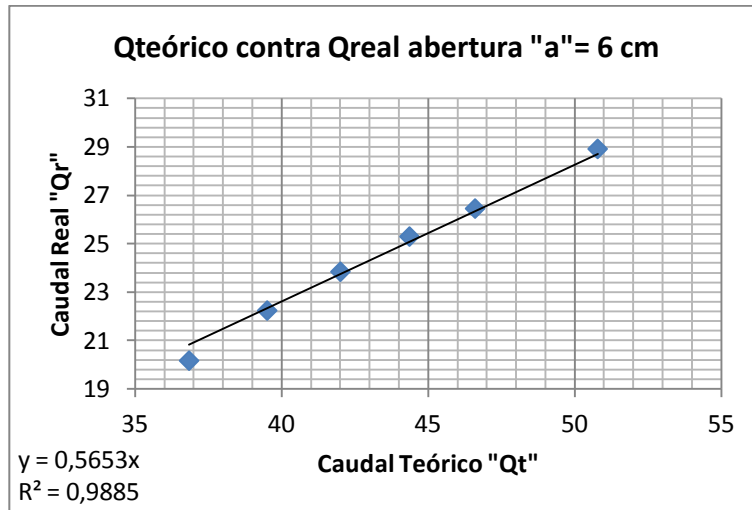
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Caudal real contra caudal teórico a= 4 cm



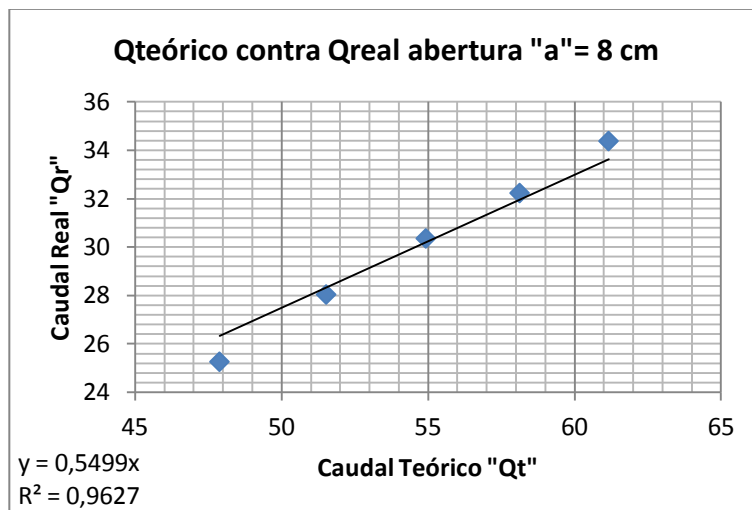
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Caudal real contra caudal teórico a= 6 cm



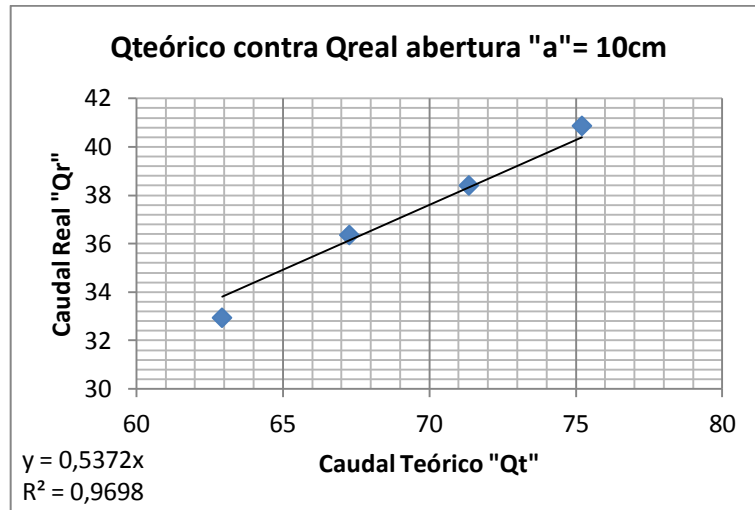
Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Caudal real contra caudal teórico a= 8 cm



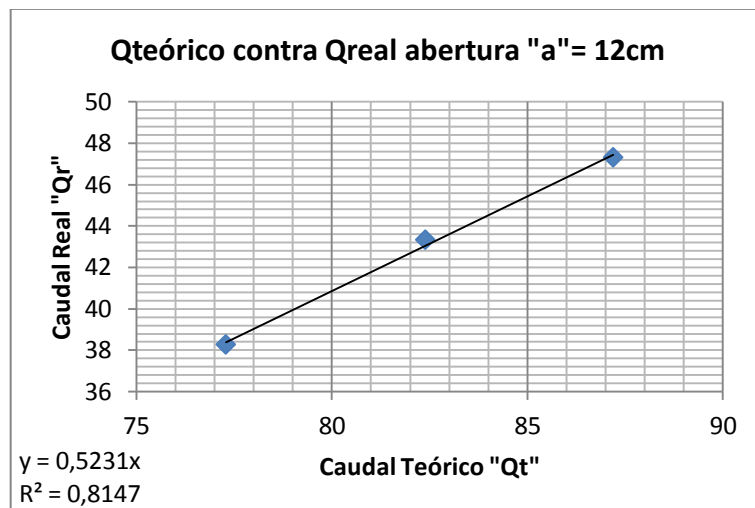
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Caudal real contra caudal teórico a= 10 cm



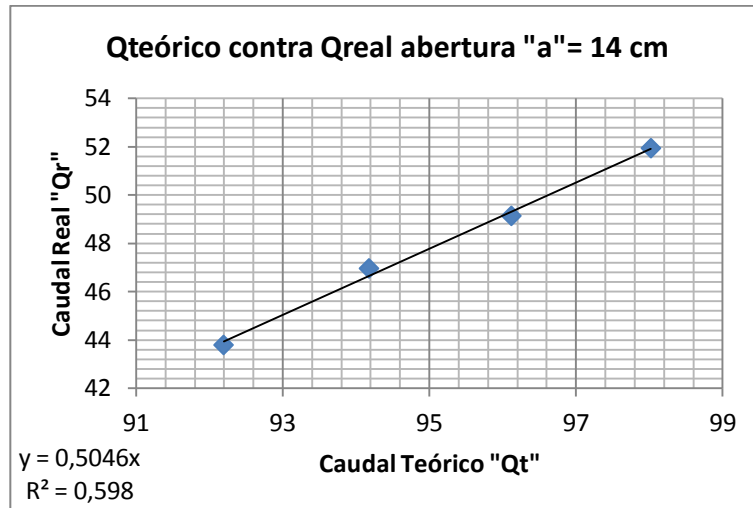
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Caudal real contra caudal teórico a= 12 cm



Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Caudal real contra caudal teórico a= 14 cm**



Fuente: elaboración propia.

3.4.4. Análisis de los resultados

El coeficiente de descarga teórico es obtenido a partir de la figura 22, mientras que el coeficiente de contracción teórico en una de sus variables tiene la relación "Cd/Cv" y el coeficiente de descarga en el numerador es el obtenido en la gráfica de Cofré y Buchheister, convirtiendo así el resultado en un valor teórico.

Tabla XV. **Coefficientes para compuerta de abertura a= 2 cm**

No	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental	Cc teórico	Cd teórico según Cofré y Buchheister
1	0,610	0,972	0,651	0,629	0,59
2	0,615	0,970	0,655	0,627	0,59
3	0,623	0,969	0,662	0,626	0,59
4	0,614	0,968	0,650	0,624	0,59
5	0,623	0,967	0,659	0,634	0,6
6	0,629	0,966	0,664	0,633	0,6
7	0,617	0,965	0,650	0,632	0,6
8	0,634	0,965	0,668	0,631	0,6
9	0,628	0,964	0,661	0,631	0,6
10	0,635	0,964	0,668	0,631	0,6
11	0,641	0,964	0,674	0,630	0,6
12	0,638	0,964	0,670	0,630	0,6
13	0,641	0,963	0,674	0,630	0,6

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Coefficientes para compuerta de abertura a= 4 cm**

No	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental	Cc teórico	Cd teórico según Cofré y Buchheister
1	0,565	0,983	0,615	0,621	0,57
2	0,574	0,980	0,621	0,617	0,57
3	0,586	0,977	0,632	0,625	0,58
4	0,588	0,975	0,632	0,623	0,58
5	0,587	0,974	0,629	0,632	0,59
6	0,589	0,972	0,629	0,630	0,59
7	0,614	0,970	0,654	0,628	0,59
8	0,603	0,969	0,640	0,627	0,59
9	0,599	0,969	0,636	0,626	0,59

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Coefficientes para compuerta de abertura a= 6 cm**

No	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental	Cc teórico	Cd teórico según Cofré y Buchheister
1	0,547	0,989	0,601	0,604	0,55
2	0,563	0,986	0,615	0,612	0,56
3	0,568	0,983	0,617	0,620	0,57
4	0,570	0,980	0,618	0,618	0,57
5	0,568	0,978	0,612	0,615	0,57
6	0,569	0,975	0,611	0,612	0,57

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Coefficientes para compuerta de abertura a= 8 cm**

No	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental	Cc teórico	Cd teórico según Cofré y Buchheister
1	0,527	1,001	0,588	0,592	0,53
2	0,544	0,996	0,603	0,599	0,54
3	0,552	0,991	0,609	0,606	0,55
4	0,554	0,988	0,608	0,615	0,56
5	0,562	0,985	0,614	0,623	0,57

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Coefficientes para compuerta de abertura a= 10 cm**

No	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental	Cc teórico	Cd teórico según Cofré y Buchheister
1	0,523	1,007	0,588	0,597	0,53
2	0,540	1,001	0,604	0,604	0,54
3	0,538	0,996	0,597	0,611	0,55
4	0,543	0,993	0,600	0,620	0,56

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Coeficientes para compuerta de abertura a= 12 cm**

No	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental	Cc teórico	Cd teórico según Cofré y Buchheister
1	0,495	1,013	0,558	0,590	0,52
2	0,526	1,007	0,592	0,597	0,53
3	0,543	1,002	0,608	0,605	0,54

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Coeficientes para compuerta de abertura a= 14 cm**

No	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental	Cc teórico	Cd teórico según Cofré y Buchheister
1	0,475	1,020	0,537	0,582	0,51
2	0,499	1,017	0,565	0,580	0,51
3	0,511	1,015	0,580	0,591	0,52
4	0,530	1,013	0,602	0,602	0,53

Fuente: elaboración propia.

3.5. Ensayo de orificios circulares

La medición de caudales se obtiene a través del aforo volumétrico, variando la altura “H” del flujo a cada 3 centímetros, medidos desde la superficie libre del líquido hasta el centro del orificio.

3.5.1. Datos obtenidos

También en los aforos de los orificios se tiene una diferencia entre caudal 1 y caudal 2 menor a 0,15 l/s, para poder tomar como aceptable el aforo.

“ ϕ_c ” se refiere al diámetro de la sección contraída y “Ac” al área contraída.

Tabla XXII. **Datos para el orificio de diámetro 15 cm**

No	H cm	ϕ_c cm	Ac cm ²	t1 s	Vol1 l	Q1 l/s	t2 s	Vol2 l	Q2 l/s	Error < 0,15
0	No controlado	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	32,5	11,9	111,2202	16,69	465,87	27,9131	14,87	414,63	27,8837	0,0295
2	29,5	11,9	111,2202	16,63	441,29	26,5358	16,56	440,55	26,6033	0,0675
3	26,5	12,0	113,0973	17,54	447,98	25,5405	19,60	499,59	25,4893	0,0512
4	19,5	12,0	113,0973	18,59	408,72	21,9860	20,00	436,84	21,8420	0,1440
5	16,5	12,0	113,0973	20,84	419,06	20,1084	22,31	449,47	20,1466	0,0381
6	13,5	11,8	109,3588	21,53	399,88	18,5732	24,78	457,66	18,4689	0,1042
7	10,5	11,8	109,3588	28,69	450,21	15,6922	26,90	422,02	15,6885	0,0038

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Datos para el orificio de diámetro 10 cm**

No	H cm	ϕ_c cm	Ac cm ²	t1 s	Vol1 l	Q1 l/s	t2 s	Vol2 l	Q2 l/s	Error < 0,15
1	44	8,0	50,2655	26,57	393,26	14,8009	30,12	441,29	14,6511	0,1498
2	41	7,9	49,0167	32,28	456,17	14,1317	30,75	430,9	14,0130	0,1187
3	38	7,9	49,0167	30,97	419,8	13,5551	32,22	440,55	13,6732	0,1181
4	35	7,9	49,0167	34,04	442,78	13,0076	33,84	445,01	13,1504	0,1428
5	32	7,9	49,0167	33,35	421,28	12,6321	33,43	422,02	12,6240	0,0081
6	29	7,9	49,0167	37,75	452,45	11,9854	34,84	416,84	11,9644	0,0210
7	22	7,9	49,0167	41,81	428,68	10,2530	42,00	425,72	10,1362	0,1169
8	19	7,9	49,0167	44,85	425,72	9,4921	48,16	462,88	9,6113	0,1192
9	16	8,0	50,2655	50,47	443,52	8,7878	51,65	453,93	8,7886	0,0008
10	13	7,9	49,0167	58,1	457,66	7,8771	54,16	428,68	7,9151	0,0380
11	10	7,9	49,0167	61,85	423,5	6,8472	60,03	419,06	6,9808	0,1336
12	7	7,9	49,0167	56	317,48	5,6693	55,00	310,26	5,6411	0,0282

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Datos para el orificio de diámetro 5 cm**

No	H	ϕ_c	Ac	t1	Vol1	Q1	t2	Vol2	Q2	Error< 0,15
1	46,5	4,0	12,5664	72,18	277,92	3,8504	84,81	327,6	3,8628	0,0124
2	43,5	4,0	12,5664	74,37	277,21	3,7274	82,09	306,65	3,7355	0,0081
3	40,5	4,0	12,5664	93,75	336,3	3,5872	82,00	292,26	3,5641	0,0231
4	37,5	4,0	12,5664	93,34	318,92	3,4168	92,28	319,65	3,4639	0,0472
5	34,5	4,0	12,5664	85,75	282,22	3,2912	97,00	317,48	3,2730	0,0182
6	31,5	4,0	12,5664	99,41	316,76	3,1864	91,78	292,26	3,1844	0,0020
7	24,5	4,0	12,5664	90,16	250,81	2,7818	108,2	300,17	2,7722	0,0097
8	21,5	3,9	11,9459	115,7	303,77	2,6244	103,7	270,06	2,6030	0,0214
9	18,5	3,9	11,9459	126,3	310,98	2,4618	168,6	413,89	2,4544	0,0074
10	15,5	3,9	11,9459	171,9	382,99	2,2271	149,9	334,12	2,2279	0,0008
11	12,5	3,9	11,9459	168,9	339,93	2,0118	178,0	358,12	2,0109	0,0009
12	9,5	3,9	11,9459	201,4	349,38	1,7342	186,0	325,43	1,7491	0,0149
13	6,5	3,9	11,9459	318,0	446,49	1,4037	290,0	388,86	1,3406	0,0631

Fuente: elaboración propia.

3.5.2. Cálculos y resultados

Se obtiene el valor experimental de los coeficientes de descarga, contracción y velocidad para orificios circulares de las ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.10 respectivamente.

Tabla XXV. **Cálculos obtenidos para el orificio de 15 cm**

No	Qr l/s	Vmedia cm/s	Qt l/s	Re 10 ⁵	Cd experimental	Cc experimental	Cv experimental
1	27,8984	252,52	44,62	3,29	0,6252	0,6294	0,9934
2	26,5695	240,58	42,51	3,14	0,6250	0,6294	0,9930
3	25,5149	228,02	40,29	2,97	0,6332	0,6400	0,9894
4	21,9140	195,60	34,57	2,55	0,6340	0,6400	0,9906
5	20,1275	179,92	31,80	2,35	0,6330	0,6400	0,9891
6	18,5210	162,75	28,76	2,12	0,6440	0,6188	1,0406
7	15,6904	143,53	25,36	1,87	0,6186	0,6188	0,9996

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Cálculos obtenidos para el orificio de 10 cm**

No	Qr l/s	Vmedia cm/s	Qt l/s	Re 10 ⁵	Cd experimental	Cc experimental	Cv experimental
1	14,7260	293,82	23,08	1,68	0,6381	0,6400	0,9971
2	14,0723	283,62	22,28	1,62	0,6317	0,6241	1,0122
3	13,6141	273,05	21,45	1,56	0,6348	0,6241	1,0172
4	13,0790	262,05	20,58	1,50	0,6355	0,6241	1,0182
5	12,6280	250,57	19,68	1,43	0,6417	0,6241	1,0282
6	11,9749	238,53	18,73	1,36	0,6392	0,6241	1,0242
7	10,1946	207,76	16,32	1,19	0,6248	0,6241	1,0011
8	9,5517	193,08	15,16	1,10	0,6299	0,6241	1,0093
9	8,7882	177,18	13,92	1,01	0,6315	0,6400	0,9868
10	7,8961	159,71	12,54	0,91	0,6295	0,6241	1,0087
11	6,9140	140,07	11,00	0,80	0,6285	0,6241	1,0070
12	5,6552	117,19	9,20	0,67	0,6144	0,6241	0,9845

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Cálculos obtenidos para el orificio de 5 cm**

No	Qr l/s	Vmedia cm/s	Qt l/s	Re 10 ⁵	Cd experimental	Cc experimental	Cv experimental
1	3,8566	302,05	5,93	0,86	0,6503	0,6400	1,0160
2	3,7315	292,14	5,74	0,83	0,6505	0,6400	1,0164
3	3,5757	281,89	5,53	0,81	0,6460	0,6400	1,0094
4	3,4403	271,25	5,33	0,77	0,6460	0,6400	1,0093
5	3,2821	260,17	5,11	0,74	0,6425	0,6400	1,0039
6	3,1854	248,60	4,88	0,71	0,6526	0,6400	1,0196
7	2,7770	219,25	4,30	0,63	0,6451	0,6400	1,0079
8	2,6137	205,39	4,03	0,59	0,6481	0,6084	1,0653
9	2,4581	190,52	3,74	0,54	0,6571	0,6084	1,0801
10	2,2275	174,39	3,42	0,50	0,6505	0,6084	1,0693
11	2,0113	156,60	3,07	0,45	0,6541	0,6084	1,0751
12	1,7416	136,52	2,68	0,39	0,6497	0,6084	1,0679
13	1,3722	112,93	2,22	0,32	0,6188	0,6084	1,0172

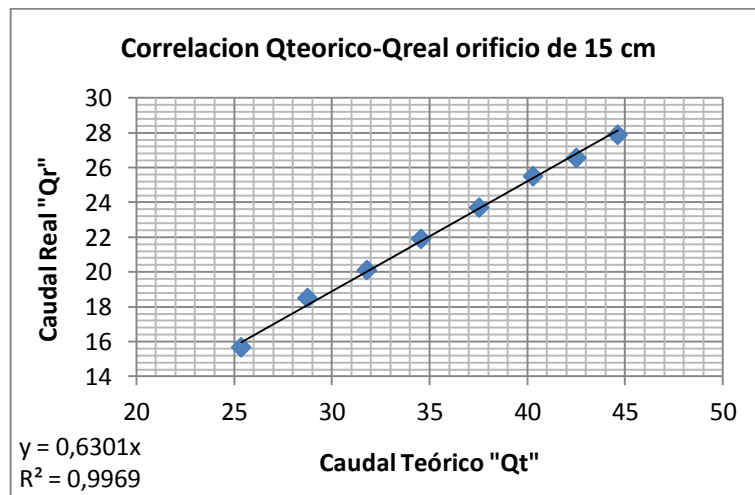
Fuente: elaboración propia.

3.5.3. Gráficas

En las gráficas se determina la ecuación que genera la recta y el porcentaje de error en la variación de los puntos, para verificar la tendencia lineal en la comparación del caudal real y caudal teórico.

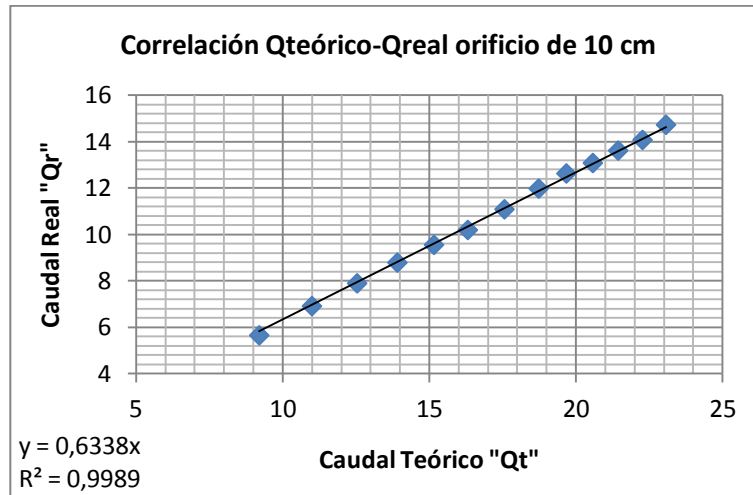
Y se deduce una ecuación con logaritmos que define el comportamiento de la variación de la altura "H" con el caudal real observado, generando un valor nuevo de comparación de caudales.

Figura 36. **Correlación orificio de 15 cm**



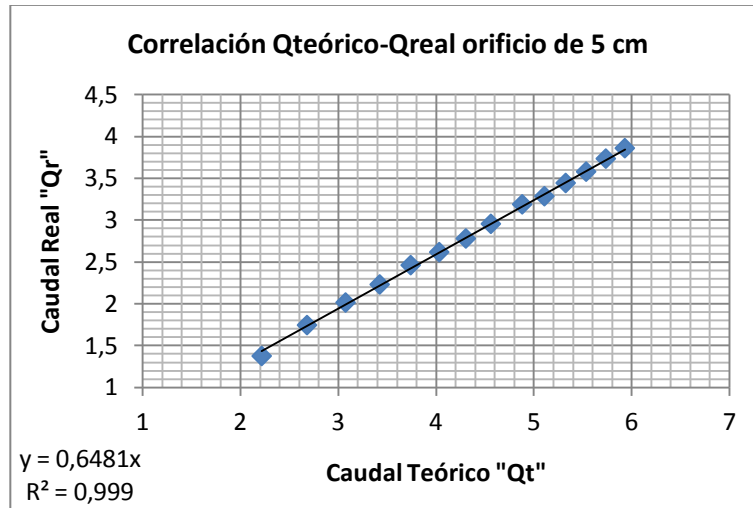
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Correlación orificio de 10 cm**



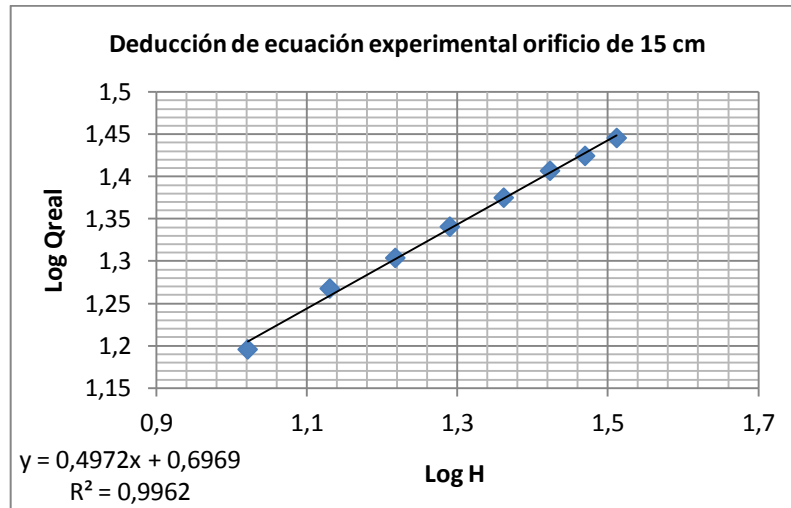
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Correlación orificio de 5 cm**



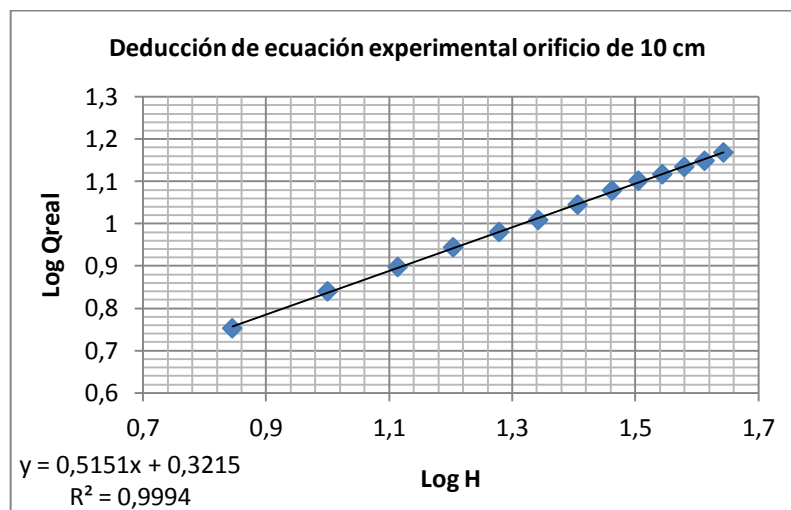
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Deducción de la ecuación para orificio de 15 cm**



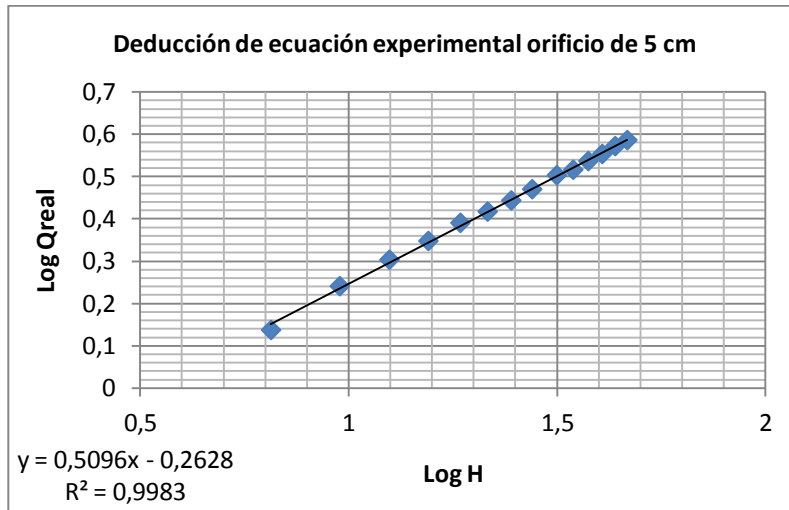
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Deducción de la ecuación para orificio de 10 cm**



Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Deducción de la ecuación para orificio de 5 cm**



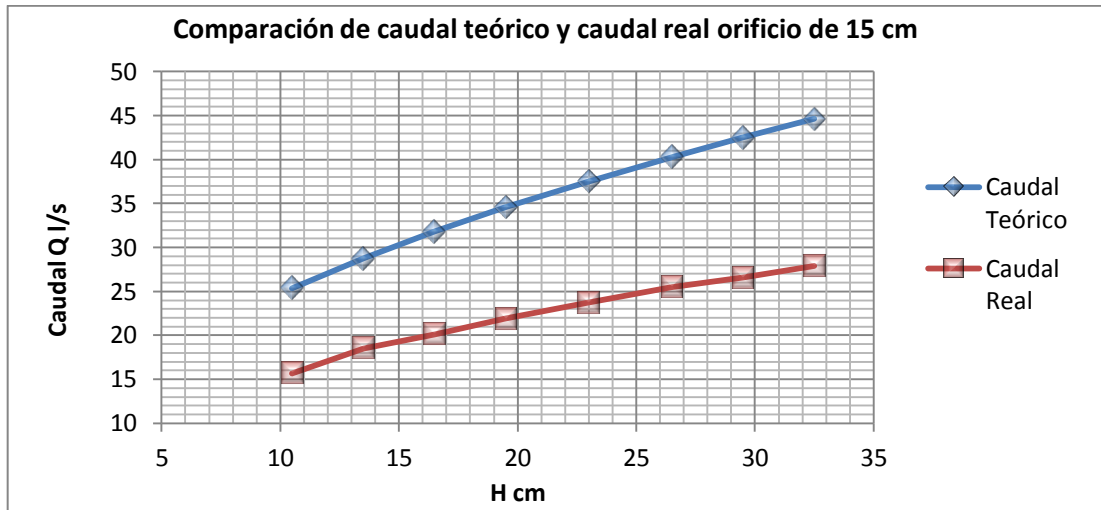
Fuente: elaboración propia.

3.5.4. Análisis de resultados

Para comparar el caudal teórico y el caudal real, los coeficientes de velocidad, contracción y gasto teóricos se obtienen de la figura 25, que incluye la variación con el número de Reynolds.

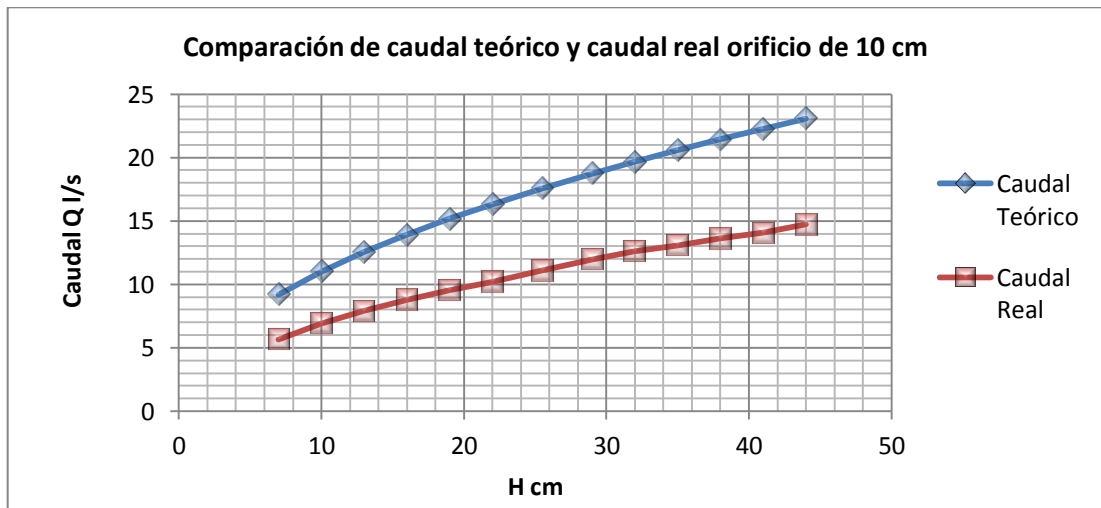
La ecuación que genere la gráfica más cercana a la proyección del caudal real observado, es la recomendable en el diseño de la estructura hidráulica.

Figura 42. **Comparación de caudales orificio de 15 cm**



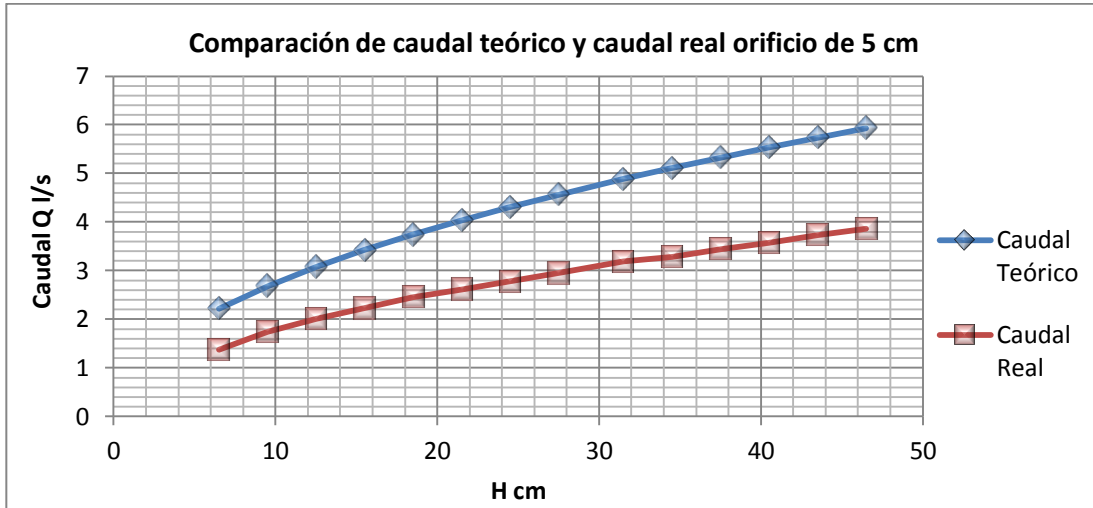
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Comparación de caudales orificio de 10 cm**



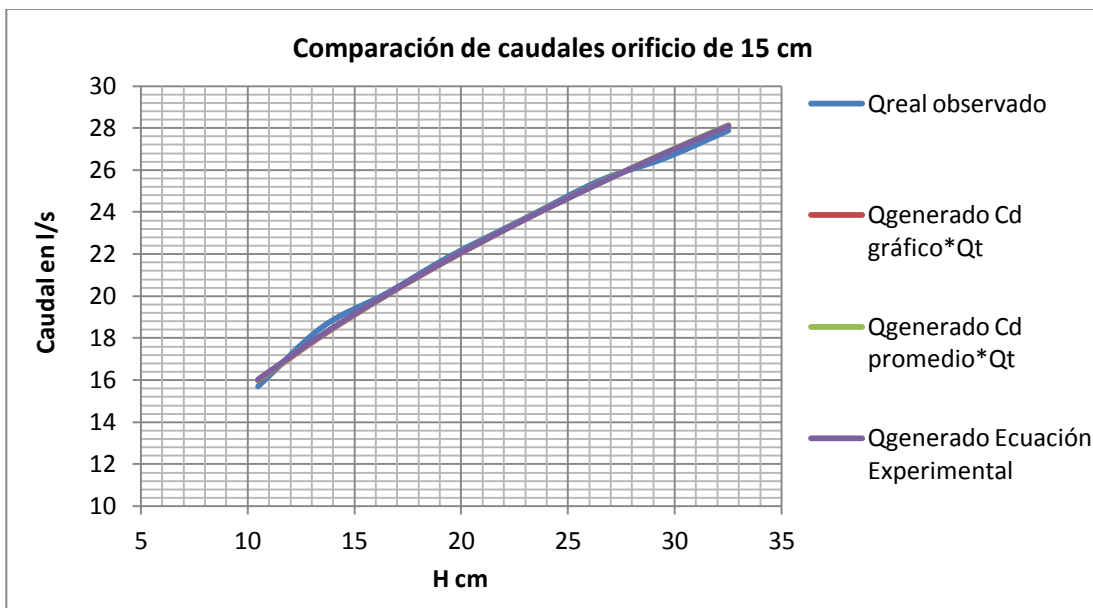
Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Comparación de caudales orificio de 5 cm**



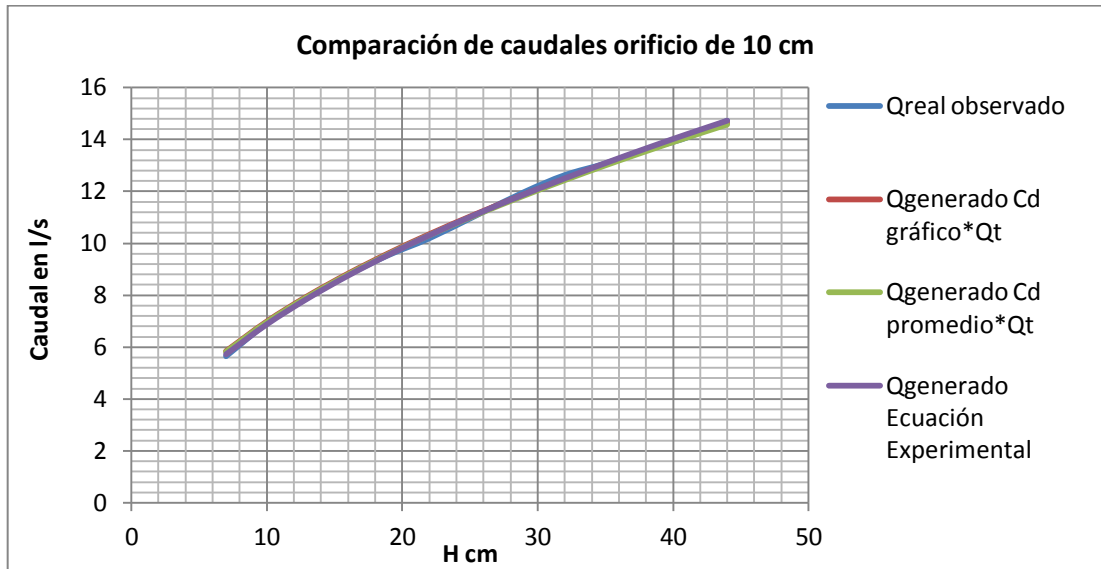
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Comparación de caudales experimentales orificio 15 cm**



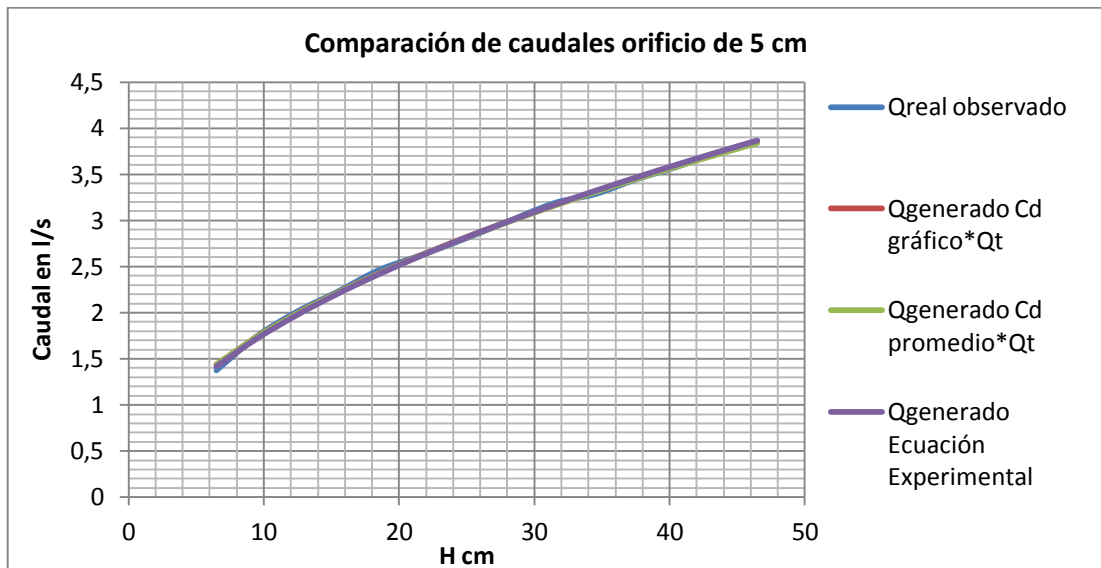
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Comparación de caudales experimentales orificio 10 cm**



Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Comparación de caudales experimentales orificio 5 cm**



Fuente: elaboración propia.

4. INSTRUCTIVO DE LA PRÁCTICA

4.1. Ensayo de compuerta de fondo

La medición de caudales se obtiene a través del aforo volumétrico, variando la abertura del flujo a cada 2 centímetros, medidos desde el fondo del canal hacia el borde biselado de la compuerta.

4.1.1. Introducción

Una compuerta es una placa que al moverse verticalmente permite graduar la abertura en el fondo del canal, controlando la descarga producida. El área de paso del flujo es el ancho del canal por la abertura en la compuerta.

4.1.2. Objetivo

Observar la descarga de la compuerta de pared delgada y calcular el coeficiente de descarga, velocidad y contracción para diferentes cargas sobre la abertura de la compuerta.

4.1.3. Equipo

Las estructuras hidráulicas instaladas, calibradas y en buenas condiciones físicas, garantizan la fiabilidad de los valores obtenidos en la práctica de laboratorio, y son:

- Bomba centrífuga
- Canal rectangular plástico
- Depósito aforador
- Cronómetro
- Compuerta (placa biselada en el extremo inferior)

4.1.4. Desarrollo de la práctica

Poner en funcionamiento la bomba centrífuga, regulando el caudal a un valor constante (el tirante y_1 debe ser estable) y establecer una abertura “a” en la compuerta.

- Medir el ancho del canal.
- Medir la carga y_1 (antes de la compuerta), distancia entre el fondo del canal y la superficie del agua.
- Medir el tirante y_2 (después de la compuerta).
- Aforar el caudal que circula por el canal, utilizando el método volumétrico, por lo menos 3 veces para obtener un caudal promedio.
- Utilizar la siguiente tabla para la toma de datos.

Tabla XXVIII. Toma de datos para ensayo de compuerta de fondo

No	Altura "y ₁ " (cm)	Altura "y ₂ " (cm)	Tiempo 1 (s)	Vol 1 (l)	Caudal "Q ₁ " (l/s)	Tiempo 2 (s)	Vol 2 (l)	Caudal "Q ₂ " (l/s)
1								
2								
3								

Fuente: elaboración propia.

4.1.5. Interpretación de resultados

Graficar para obtener la tendencia lineal y el porcentaje de error en la comparación del caudal real y el caudal teórico. Utilizar las ecuaciones que se describen a continuación.

- Calcular cada caudal aforado $Q = \text{Vol} / t$, en l / s.
- Obtener el promedio de los caudales aforados.
- Calcular la velocidad teórica $V_t = \sqrt{2gy_1}$.
- Determinar el caudal teórico $Q_t = a \cdot b \cdot V_t$. “a” abertura de la compuerta, “b” ancho del canal.
- Calcular el coeficiente de descarga, velocidad y contracción experimental, C_d , C_v y C_c , respectivamente.

$$C_d = \frac{Q_{\text{promedio}}}{Q_{\text{teórico}}} \quad C_v = 0,960 + 0,0979 \frac{a}{y_1}$$

$$C_c = \frac{1}{2} \frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v} \right)^2 + \sqrt{\left[\frac{1}{2} \frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{C_d}{C_v} \right)^2}$$

- Calcular la relación y_1 / a .
- Con la relación y_1 / a determine el valor del C_d en la gráfica de Cofré y Buchheister.
- Determinar el C_c teórico con $C_v=1$ y C_d según Cofré y Buchheister.
- Graficar caudal real promedio contra caudal teórico.
- Utilizar la siguiente tabla para los cálculos.

Tabla XXIX. **Cálculo de coeficientes de la compuerta**

No	Q _{real} promedio (l/s)	V _{media} (cm/s)	Q _{teórico} (l/s)	C _d experimental	C _v experimental	C _c experimental
1						
2						
3						

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Comparación de coeficientes de la compuerta**

No	C _d experimental	C _v experimental	C _c experimental	C _c teórico	C _d teórico según Cofré y Buchheister
1					
2					
3					

Fuente: elaboración propia.

4.2. Ensayo de orificios circulares de pared delgada

La medición de caudales se obtiene a través del aforo volumétrico, variando la altura “H” del flujo a cada 3 centímetros, medidos desde la superficie libre del líquido hasta el centro del orificio.

4.2.1. Introducción

En los canales abiertos se construyen una variedad de estructuras hidráulicas que se diseñan como instalaciones de tipo único, cada situación tiene necesidades específicas debido a las condiciones del lugar, terreno, filtración, erosión, sedimentación, etc.

Las fórmulas de diseño para las estructuras hidráulicas se derivan de la aplicación del teorema de Bernoulli al flujo sobre la estructura antes y después de la misma. Una estructura hidráulica ocasiona cambios localizados y concentrados en el flujo de fluidos y sólo un pequeño porcentaje siguen un patrón de diseño estandarizado. La energía total disponible en el centro del orificio equivale a la altura o profundidad de agua h .

4.2.2. Objetivo

Observar la descarga de un orificio de pared delgada y analizar el coeficiente de descarga, velocidad y contracción para diferentes cargas sobre el orificio.

4.2.3. Equipo

Las estructuras hidráulicas instaladas, calibradas y en buenas condiciones físicas, garantizan la fiabilidad de los valores obtenidos en la práctica de laboratorio, y son:

- Bomba centrífuga
- Canal rectangular plástico
- Depósito aforador
- Cronómetro
- Placa con orificio
- Regla graduada en milímetros

4.2.4. Desarrollo de la práctica

Poner en funcionamiento la bomba centrífuga, regulando el caudal a un valor constante (la altura “H” debe ser estable) y establecer el diámetro del orificio a ensayar.

- Medir la carga H, distancia entre el centro del orificio y la superficie del agua.
- Medir el diámetro de la vena contraída en la descarga.
- Determinar el área de la vena contraída.
- Aforar el caudal que circula por el canal, utilizando el método volumétrico, por lo menos 3 veces para obtener un caudal promedio.
- Utilizar la siguiente tabla para la toma de datos.

Tabla XXXI. Toma de datos para el ensayo del orificio

No	H cm	ϕ_c cm	Ac cm ²	t1 s	Vol1 l	Q1 l/s	t2 s	Vol2 l	Q2 l/s	Error < 0,15
1										
2										
3										
13										

Fuente: elaboración propia.

4.2.5. Interpretación de resultados

Graficar para obtener la tendencia lineal y el porcentaje de error en la comparación del caudal real y el caudal teórico. Utilizar las ecuaciones que se describen a continuación.

- Calcular cada caudal aforado $Q = \text{Vol} / t$, en l / s.
- Obtener el promedio de los caudales aforados.
- Calcular la velocidad teórica $V_t = \sqrt{2gH}$.
- Determinar el caudal teórico $Q_t = \text{Área del orificio} \cdot V_t$.
- Determinar el número de Reynolds.
- Calcular el coeficiente de descarga, contracción y velocidad experimental, C_d , C_c y C_v , respectivamente.

$$C_d = \frac{Q_{\text{promedio}}}{Q_{\text{teórico}}} \quad C_c = \frac{A_{\text{contraída}}}{A_{\text{orificio}}} \quad C_v = \frac{C_d}{C_c}$$

- Con el número de Reynolds comparar los coeficientes antes calculados, utilizando la gráfica de valores teóricos.
- Graficar caudal real promedio contra caudal teórico.
- Comparar los caudales real promedio y teórico en el mismo gráfico.
- Utilizar la siguiente tabla para los cálculos.

Tabla XXXII. **Cálculo de coeficientes del orificio**

No	Qr l/s	Vmedia cm/s	Qt l/s	Re 10 ⁵	Cd experimental	Cc experimental	Cv experimental
1							
2							
3							

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Comparación de coeficientes del orificio**

No	Cd experimental	Cv experimental	Cc experimental	Según variación de los coeficientes en la gráfica con el número de Reynolds		
				Cd	Cv	Cc
1						
2						
3						

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. En todo conducto hidráulico es importante conocer el gasto que está circulando en un determinado instante o a lo largo de un determinado tiempo, por lo que resulta necesario instalar una estructura hidráulica de aforo. Los orificios son buenos medidores de caudales en la derivación de un canal principal a canales secundarios.
2. Cuando el flujo de agua sale por el orificio y va abandonando a éste, el chorro va contrayéndose gradualmente, por lo que es importante el considerar el coeficiente de contracción para calcular el caudal.
3. Al comparar los caudales reales observados con los caudales generados en los orificios, de todos los diámetros, se puede observar que el caudal generado con la ecuación $Q_r = C_{d_{\text{experimental}}} * Q_t$ es la que presenta menor error de medición respecto del caudal real observado. Sin embargo, las otras dos ecuaciones deducidas también son confiables, ya que presentan un margen de error bajo.
4. Se logró simular el flujo en orificios y compuertas con la limitante que en ambos ensayos la descarga fue libre y el tirante mayor fue de 56 centímetros, pues tirantes mayores a éste, imposibilitan el aforo volumétrico.

5. En el cálculo de los coeficientes de la compuerta se puede observar que para relaciones de Y_1/a menores de 16 tiene relaciones mayores a 0,61, lo cual coincide con el diagrama de Cofré y Buchhesteir y para valores Y_1/a tiende a tomar valores de 0,63, el cual no es lejano a los valores descritos en la gráfica.
6. Al comparar los caudales reales observados con los caudales generados en las compuertas para las distintas aberturas “a”, se puede observar que el caudal generado con la ecuación $Q_r = C_{d_{\text{experimental}}} * Q_t$ es la que presenta menos error de medición comparado con la fórmula que se usó para la gráfica de Cofré y Buchhesteir. Sin embargo, las otras dos ecuaciones deducidas también son confiables, ya que presentan un margen de error bajo.
7. Se comprobó que la relación entre el tirante Y_2 después de la compuerta y la abertura “a” presenta un error del 25 por ciento, por lo cual no es muy confiable. Sin embargo esta relación no está involucrada en la fórmula para determinar el caudal.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario biselar el perímetro de los orificios y la parte baja de las compuertas, para así garantizar que el flujo sobre las mismas sea libre y no presenten escurrimientos o ahogamientos en sus paredes, ya que esto da lugar al caso de descarga ahogada.
2. Antes de tomar lecturas de carga Y_1 , en los orificios y en las compuertas se debe esperar a que se estabilice el flujo de agua en el canal, para obtener medidas precisas.
3. Es necesario que las ranuras estén completamente selladas con silicón para evitar fugas de agua en las paredes del canal.
4. Considerar que las placas tengan un espesor de 4 milímetros, para evitar el flexionamiento debido a la fuerza hidrostática ejercida por el tirante Y_1 de agua.
5. Las estructuras hidráulicas analizadas se recomiendan como opción de diseño y utilización, por presentar facilidad de construcción.
6. En el caso de usar orificios como medidores de flujo debe tomarse en cuenta que en los caudales no existan sedimentos grandes, debido a que éstos podrían obstruir la circulación.

BIBLIOGRAFÍA

1. GILES, Ronald V. *Mecánica de fluidos e hidráulica*. México: Mc-Graw Hill, 1994. 567 p.
2. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. 6ª ed. México: Pearson Educación, 2006. 627 p.
3. RODRÍGUEZ DÍAZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica Experimental*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1990-2000. 337 p.
4. SIMON, L Andrew. *Hidráulica Básica*. Estados Unidos: Limusa, 1992. 620 p.
5. SOTELO AVILA, Gilberto. *Hidráulica General*. México: Limusa, 1999. 561 p.
6. STREETER, Víctor L.; WYKE, Benjamín. *Mecánica de los fluidos*. México: Mc-Graw Hill, 1999. 740 p.
7. VILLÓN BÉJAR, Máximo. *Hidráulica de canales*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica, 1995. 487 p.
8. GEYMET, Alfredo Bianco. Elaborada en un proceso constructivo. [en línea] <http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Alfredobi>. [Consulta: 25 de julio de 2013].