

**IMPLEMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS DE AFORO
CON FINES PEDAGÓGICOS EN EL CANAL DE PENDIENTE VARIABLE DE LA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL CHOCÓ**



**MANUAL INSTRUCTIVO ESTRUCTURAS DE AFORO LABORATORIO DE
HIDRÁULICA DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL CHOCÓ**

**REALIZADO POR:
YARLY ENITH MOSQUERA TORRES**

**DIRECTOR
MSc. JOSÉ LUIS GARCÍA
Profesor Universidad del Valle**

**MAESTRÍA DE GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DEL VALLE**

Santiago de Cali, mayo de 2024

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN.....	6
DESCRIPCIÓN DEL CANAL DE PENDIENTE VARIABLE (CPV).....	7
PRÁCTICA 1: ESTUDIO Y PATRONAMIENTO DE VERTEDEROS 8	
DE PARED DELGADA.....	8
OBJETIVOS.....	8
GENERALIDADES	8
FLUJO A TRAVÉS DE VERTEDEROS.....	8
FUNCIONES DE LOS VERTEDEROS.....	10
CLASIFICACIÓN DE LOS VERTEDEROS	11
ECUACIONES DE LOS VERTEDEROS	13
REQUISITOS GENERALES DE INSTALACIÓN DE VERTEDEROS EN CANALES	17
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	17
INFORME	18
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19
 PRÁCTICA 2: ESTUDIO Y PATRONAMIENTO DE VERTEDEROS DE PARED GRUESA (RECTANGULAR REDONDO Y TIPO CRUMP).....	 21
OBJETIVOS.....	21
GENERALIDADES	21
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	25
INFORME	25
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
 PRÁCTICA 3: CANALETA PARSHALL	 28
OBJETIVOS.....	28
GENERALIDADES	28
ZONAS DE LA CANALETA PARSHALL.....	29
FUNCIONAMIENTO.....	29
PRINCIPALES VENTAJAS	30
CLASIFICACIÓN DE LOS MEDIDORES PARSHALL	30
ECUACIONES.....	31
PROCEDIMIENTO.....	32
INFORME	33
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

PRÁCTICA 4: CANALETA VENTURI.....	37
OBJETIVOS.....	37
GENERALIDADES.....	37
CLASIFICACIÓN DE LOS MEDIDORES VENTURI.....	38
ECUACIONES.....	39
PROCEDIMIENTO.....	41
INFORME	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1.1. Registro de datos tomados en el laboratorio	18
Tabla 1.2. Datos calculados.....	18
Tabla 1.3. Datos calculados continuación.....	19
Tabla 1.4. Cuadro comparativo de caudales.....	19
Tabla 2.1. Clasificación del funcionamiento de los vertederos, según la relación e/H	22
Tabla 2.2. Tipos de perfil de vertederos de cresta ancha.....	23
Tabla 2.3. Registro de datos tomados en el laboratorio	25
Tabla 2.4. Datos calculados.....	26
Tabla 2.5. Datos calculados continuación.....	26
Tabla 2.6. Cuadro comparativo de caudales.....	26
Tabla 3.1. Valores de coeficiente K y exponente n	31
Tabla 3.2. Diseños estándar de aforadores Parshall, características hidráulicas	32
Tabla 3.3. Registro de datos tomados en el laboratorio	33
Tabla 3.3. Datos calculados.....	34
Tabla 3.4. Registro de datos calculados - continuación	35
Tabla 3.5. Cuadro comparativo de caudales.....	35
Tabla 4.1. Valores de C_v según el apéndice de RF State Standar.....	40
Tabla 4.2. Registro de datos tomados en el laboratorio	41
Tabla 4.3. Datos calculados – canaleta Venturi	42
Tabla 4.4. Registro de datos calculados canaleta Venturi - continuación	43
Tabla 4.5. Cuadro comparativo de caudales – canaleta Venturi	43

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1. Canal de pendiente variable laboratorio de hidráulica utch	7
Figura 1.1. Flujo a través de vertederos	8
Figura 1.2. Lámina libre.....	9
Figura 1.3. Lámina abatida.....	9
Figura 1.4. Lámina adherida	10
Figura 1.5. Lámina ahogada superiormente	10
Figura 1.6. Vertedero de pared delgada	11
Figura 1.7. Flujo a través de vertederos de cresta ancha	11
Figura 1.8. Algunas formas geométricas de los vertederos.....	12
Figura 1.9. Vertedero de descarga libre	12
Figura 1.10. Vertedero de descarga ahogada	12
Figura 1.11. Vertedero con una contracción lateral	13
Figura 1.12. Vertedero con dos contracciones laterales	13
Figura 1.13. Vertedero sin contraccion lateral	13
Figura 1.14. Vertedero triangular.....	15
Figura 1.15. Vertedero trapezoidal.....	15
Figura 1.16. Vertedero semicircular.....	16
Figura 2.1. Flujo a través de vertederos de cresta ancha	21
Figura 2.2. Vertederos de cresta ancha con descarga libre y sumergido.....	22
Figura 2.3. Vertedero de cresta ancha	22
Figura 3.1. Canal de aforo Parshall	28
Figura 3.2. Canaleta Parshall con descarga libre.....	30
Figura 3.3. Canaleta Parshall con descarga ahogada.....	31
Figura 3.4. Secciones de la canaleta Parshall	31
Figura 4.1. Canaleta Venturi (vista en planta).....	38
Figura 4.2. Canaleta Venturi con descarga libre (perfil).....	38
Figura 4.3. Canaleta Venturi con descarga ahogada	38
Figura 4.4. Sección representativa para el cálculo del caudal en el canal de aforo Venturi.....	39

INTRODUCCIÓN

Este manual es un soporte teórico, elaborado con el propósito de brindarle al estudiante de ingeniería una serie de apuntes para consulta, siendo un complemento a la asignatura de hidráulica de canales abiertos. Los alumnos en el laboratorio pueden observar los fenómenos hidráulicos enseñados en forma teórica, confirmando por medio de la experimentación los conceptos teóricos y entendiendo el comportamiento real de fenómenos físicos. La experimentación permite que los estudiantes afiancen los conceptos teóricos para que puedan aplicarlos en el estudio, diseño y construcción de sistemas hidráulicos.

Este manual es útil para realizar las prácticas de hidráulica de canales abiertos, tales como: vertedero de cresta ancha tipo Crump, vertedero de pared gruesa rectangular, vertedero tipo Cipolletti, canal de aforo Parshall, canal de aforo Venturi y dispositivo de orificios. Esta serie de prácticas de laboratorio permitirán que los estudiantes validen experimentalmente las estructuras de aforo y los fenómenos hidráulicos presentes.

El manual contiene cuatro (4) laboratorios los cuales comprenden la fundamentación teórica, los objetivos de la respectiva práctica, la descripción detallada del proceso a seguir durante la realización de cada experimento y las ecuaciones básicas a utilizar, complementada con modelos de tablas para el registro de datos medibles y calculables, encabezada con leyendas y nombres de las variables involucradas en la práctica, al igual la forma como se hacen los cálculos numéricos. Este manual le permite al estudiante ahorrar tiempo en la elaboración de sus informes de laboratorio de la asignatura hidráulica de canales abiertos.

DESCRIPCIÓN DEL CANAL DE PENDIENTE VARIABLE (CPV)

Descripción general: es un canal abierto, con una longitud total de 6.15m, ancho de 0.85m y alto de 1.7m. Posee un circuito de recirculación del agua, sus paredes están construidas en vidrio, la estructura que lo sostiene está construida en acero inoxidable. Además, tiene una bomba de 10HP que permite un caudal máximo de 700GPM. El ancho de la sección transversal del canal donde se realizan las prácticas es de 0.30m.

Las prácticas que se pueden realizar son: estudio de flujo uniforme, energía específica y flujo crítico, flujo gradualmente variado, estudio de compuerta plana, estudio de vertederos de pared delegada (triangular, rectangular, trapecial, circular) y gruesa, canaletas Parshall y Venturi y resalto hidráulico.

Adicionalmente se dispone de una unidad medidora de caudal (medidor de flujo por ultrasonido).



Figura 1.1. Canal de pendiente variable laboratorio de hidráulica UTCH

PRÁCTICA 1: ESTUDIO Y PATRONAMIENTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA

OBJETIVOS

- ✓ Observar el comportamiento de los vertederos como estructuras hidráulicas concebidas para el control de niveles y medición de caudales.
- ✓ Definir la ecuación de patronamiento teórico – práctica de un vertedero de pared delgada.
- ✓ Determinar la utilización óptima de un vertedero de acuerdo a sus características.
- ✓ Determinar cuál de los vertederos estudiados es el de mayor eficiencia.

GENERALIDADES

Un vertedero según Balloffet, es una abertura o escotadura de contorno abierto practicada en la pared de un depósito, o en una barrera colocada en un canal, por la cual escurre o rebosa el líquido contenido en el depósito. También se puede definir como un dique o pared delgada que presenta una escotadura de forma regular, a través de la cual fluye una corriente líquida; el vertedero intercepta la corriente causando una elevación del nivel aguas arriba y se emplea para controlar niveles.

Flujo a través de vertederos

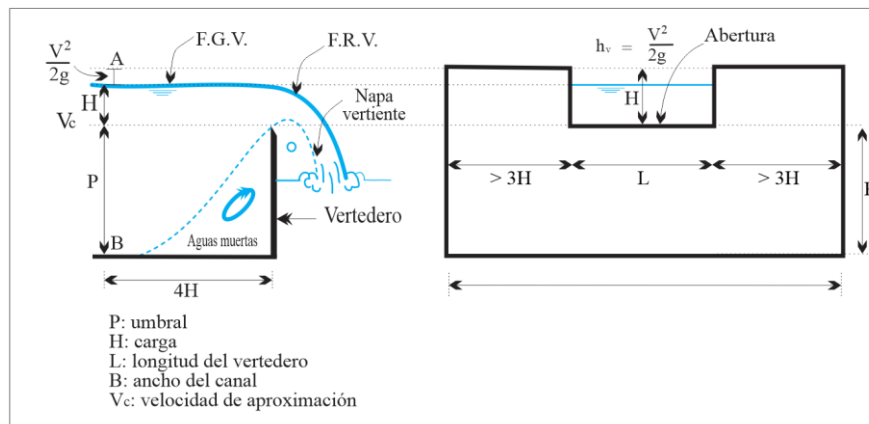


Figura 1.1. Flujo a través de vertederos

El chorro descargado por la abertura de un vertedero, forma una hoja llamada napa o lámina vertiente, entre ellas se pueden enumerar las siguientes:

Lamina libre: Se presenta cuando la lámina vertiente está completamente sometida a presión atmosférica, ver figura 1.2.

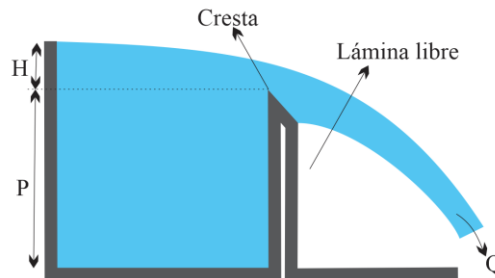


Figura 1.2. Lámina libre

Donde H es la carga hidráulica sobre el vertedero y P es la altura vertical desde la base del vertedero hasta su cresta.

Lamina abatida: Cuando la pared aguas abajo del vertedero está en contacto con la atmósfera y la lámina de agua se adhiere parcialmente a la pared del vertedero, ver figura 1.3.

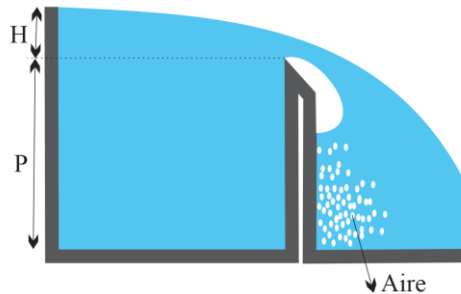


Figura 1.3. Lámina abatida

Lamina adherente: La ventilación entre la vena contraída y la pared del vertedero aguas abajo es nula, permitiendo que la lámina de agua este completamente adherida a la pared del vertedero, ver figura 1.4.

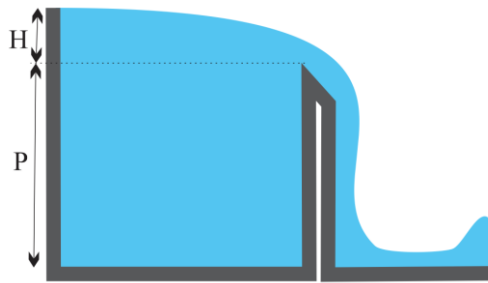


Figura 1.4. Lámina Adherida

Lámina ahogada superiormente: un vertedero funciona ahogado, cuando el nivel de la cresta del vertedero está por debajo del nivel de agua, aguas abajo del vertedero, es decir cuando el nivel aguas abajo es superior al de la cresta $P' > P$, ver figura 1.5.

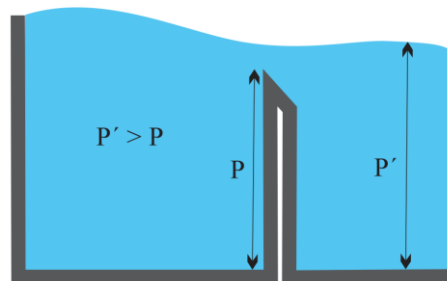


Figura 1.5. Lámina ahogada superiormente

Donde P es la altura de la cresta del vertedero y P' es la altura del nivel de aguas abajo del vertedero.

Funciones de los vertederos

- ❑ Como instrumento para medir el caudal, ya sea en forma permanente, en cuyo caso se asocia con una medición y registro de nivel permanente, o en una instalación provisional, para aforar fuentes hídricas.
- ❑ Garantizar un nivel con poca variación en un canal de riego, aguas arriba. Este tipo de vertedero se llama "pico de pato" por su forma.
- ❑ Mediante la ecuación del vertedero se puede medir el caudal que está circulando por el mismo.
- ❑ Estructura de repartición de caudales.

- ❑ Descarga de demasías, permitiendo la salida del exceso de agua de las represas, ya sea en forma libre, controlada o mixta, en este caso, el vertedero es también conocido como aliviadero. Estas estructuras son las encargadas de garantizar la seguridad de la obra hidráulica como un todo.

Clasificación de los vertederos

- ❑ Según el espesor de la pared

Vertederos de pared delgada: Este tipo de vertedero es el más usado, especialmente como aforador, por ser una estructura de fácil construcción e instalación, ver figura 1.6.

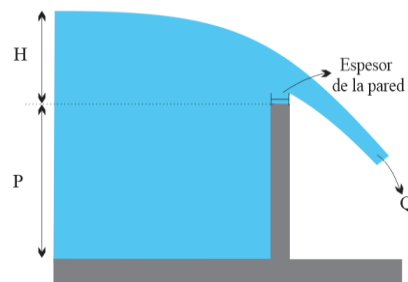


Figura 1.6. Vertedero de pared delgada

Vertederos de cresta ancha o de pared gruesa: cuando la cresta que permite establecer un paralelismo en los filetes, ver figura 1.7.

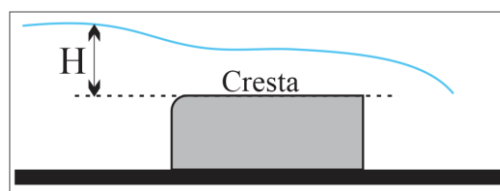


Figura 1.7. Flujo a través de vertederos de cresta ancha

- ❑ Según la forma geométrica: Los vertederos pueden ser rectangulares, triangulares, trapezoidales, parabólicos, semicirculares, mixtos, etc., ver figura 1.8.

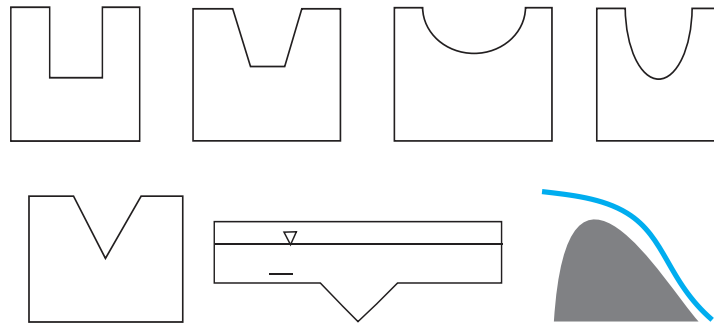


Figura 1.8. Algunas formas geométricas de los vertederos

- ☐ Según la altura de la lámina de agua, aguas abajo: Pueden ser de descarga libre o sumergida, ver figura 1.9 y 1.10 respectivamente.

De descarga libre

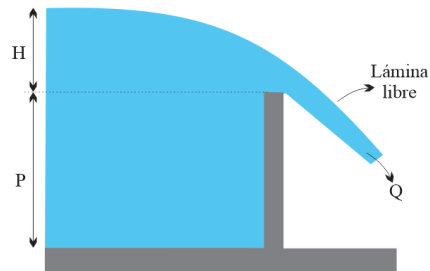


Figura 1.9. Vertedero de descarga libre

De descarga sumergida o ahogada

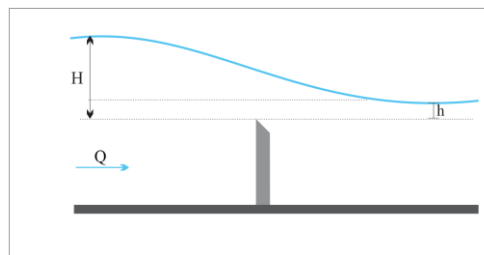


Figura 1.10. Vertedero de descarga ahogada
Tomado de Hidráulica de Canales. Arturo Rocha

Donde H es la carga hidráulica aguas arriba del vertedero y h es la carga hidráulica aguas abajo del vertedero.

- ☐ Según la ubicación del orificio pueden ser:

Con una contracción lateral:

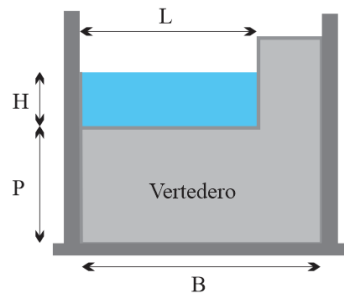


Figura 1.11. Vertedero con una contracción lateral

Con dos contracciones laterales:

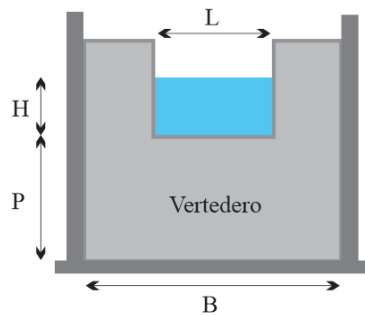


Figura 1.12. Vertedero con dos contracciones laterales

Sin contracciones laterales:

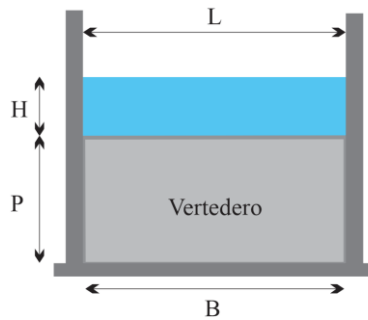


Figura 1.13. Vertedero sin contraccion lateral

Ecuaciones de los vertederos

La ecuación general de los vertederos obedece a la forma $Q = K H^m$.

Donde Q es caudal, K es una constante de calibración, H es la carga medida desde la superficie hasta la elevación de la cresta del vertedero y m exponente. Así según la forma de la cresta del vertedero existen varias ecuaciones para calcular el caudal que está circulando por el mismo, entre las cuales se tiene:

❑ *Vertederos rectangulares*

La ecuación más usada es la de Francis para un vertedero rectangular de pared delgada sin contracciones (figura 2.13) es:

$$Q = 1.84 L H^{3/2} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde: Q es el caudal que fluye por el vertedero en m^3/s . L es ancho de cresta, en m y H es la carga en el vertedero, en m.

Para un vertedero rectangular, de cresta aguda con contracciones (figura 1.12), cuando la longitud de cresta es menor que el ancho del canal, la ecuación de Francis queda expresada como:

$$Q = 1.84(L - 0.1n H)H^{3/2} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Donde: Q caudal que fluye por el vertedero en m^3/s , L ancho de cresta en m, H carga en el vertedero en m y n es el número de contracciones (1 o 2).

❑ *Vertederos triangulares*

Algunas ecuaciones propuestas para este tipo de vertederos son:

La propuesta por Thomson:

$$Q = 1.4 H^{5/2} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde Q en m^3/s y H en m.

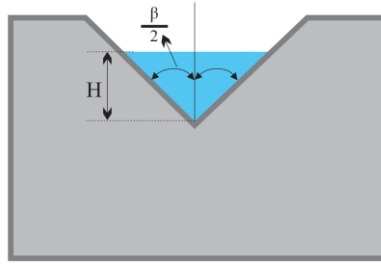


Figura 1.14. Vertedero triangular

Para vertederos triangulares con $\beta = 90^\circ$, el profesor Horance King, obtuvo la siguiente expresión:

$$Q = 1.34 H^{2.47} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde Q en m^3/s y H en m.

Mr. Cone también propuso las siguientes fórmulas para otros valores de escotaduras así:

$$Q = 0.775 H^{2.47} \quad \text{para } \beta = 60^\circ \quad \text{Ecuación 1.5}$$

$$Q = 0.3564 H^{2.47} \quad \text{para } \beta = 30^\circ \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Para β de 45° , 60° y 90° Gourley y Crump propusieron la siguiente fórmula:

$$Q = 1.32 \tan \frac{\beta}{2} H^{2.48} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

❑ Vertederos trapeciales o Cipolletti

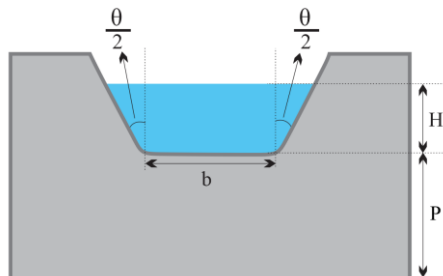


Figura 1.15. Vertedero trapezoidal

Según F. J. Domínguez, Cipolletti encontró experimentalmente que una ecuación empírica para un vertedero Cipolletti:

$$Q = 1.86 b H^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Esta ecuación es válida para $\tan \theta/2 = 1/4$, $H < b/3$, con Q en m^3/s , b y H están en metros.

❑ *Vertedero semicircular*

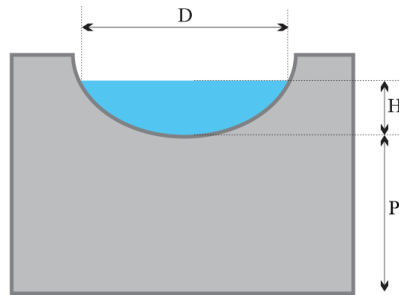


Figura 1.16. Vertedero semicircular

Según Staus – Von Sanden el caudal se puede calcular con la ecuación:

$$Q = C_d \phi D^{5/2} \quad \text{Ecuación 1.9}$$

D se expresa en m, Q se obtiene en m^3/s y ϕ $\text{m}^{1/2}/\text{s}$.

$$\phi = 3.203 \left(\frac{H}{D}\right)^{1.975} - 0.842 \left(\frac{H}{D}\right)^{3.78} \quad \text{Ecuación 1.10}$$

De otro lado, según Stauss y Jorissen, el coeficiente de descarga C_d , se puede determinar empleando la siguiente ecuación:

$$C_d = 0.555 + \frac{D}{110H} + 0.041 \frac{H}{D} \quad \text{Ecuación 1.11}$$

Válida para $0.20\text{m} \leq D \leq 0.30$ y $0.075 < \frac{H}{D} < 1.00$

La ecuación planteada por Acevedo y Acosta es:

$$Q = 1.518 D^{0.693} H^{1.807}$$

Ecuación 1.12

Donde D y H están en metros.

Requisitos generales de instalación de vertederos en canales

Los requisitos generales de la instalación de los vertederos en un canal son:

- a) El vertedero deberá ubicarse en canales de sección uniforme y alineamiento recto aguas arriba.
- b) El plano del vertedero debe ser normal al flujo y la cresta aguas arriba, perfectamente vertical, plana, lisa y nivelada.
- c) La lectura de la carga h sobre la cresta se mide con una regla graduada o limnómetro ubicado por lo menos a una distancia 4 veces la carga máxima hacia aguas arriba. ($L > 4h$).
- d) Para asegurar su funcionamiento con descarga libre, debe instalarse un dispositivo de ventilación que comunique la carga aguas abajo del vertedero con la atmósfera.
- e) Si la instalación del vertedero es permanente, debe dejarse un dispositivo de drenaje.
- f) Se recomienda que la cresta sea de material resistente a la corrosión.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Mida las características geométricas de los vertederos.
2. Colocar la pendiente longitudinal del C.P.V. en 0.
3. Instale el vertedero de pared delgada que va estudiar en el canal.
4. Alimente el canal con un caudal y mida simultáneamente la carga H en el vertedero y el caudal que circula por el canal.
5. Cambie el caudal y repita los pasos 3 y 4.
6. Consigne los datos en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Registro de datos tomados en el laboratorio

No de lectura	Carga H (cm)	Caudal observado Q (l/s)	Longitud L (cm)	Esquema vertedero

INFORME

1. Calcule los logaritmos de los caudales observados.
2. Grafique los puntos $\log H$ vs $\log Q$.
3. Tenga en cuenta la ecuación de la recta ($Y = mX + b$).
4. Establezca la línea de tendencia y obtenga la ecuación de la recta. Determine el valor de K y el valor de n . Recuerde que: $n = m$ y $K = \log^{-1}(b)$.
5. Defina la ecuación de patronamiento generada $Q = K H^n$.
6. Realice la comparación entre el caudal real y el caudal con la ecuación generada.
7. Grafique los valores de los caudales calculados (H_i vs Q_{gen}).
8. Calcule el caudal $Q_{teorico}$. Utilice la ecuación del $Q_{teorico}$ de acuerdo con el tipo de vertedero utilizado en la práctica.
9. Grafique los valores Q_{obs} vs $Q_{teorico}$.
10. Obtenga el valor de $C_{di} = \frac{Q_{obs}}{Q_{teorico}}$ y el valor del $C_{dprom} = \sum_1^n \frac{C_{di}}{n}$.
11. Defina la ecuación para calcular el Q_{real} usando el C_{dprom} .
12. Compare los caudales observado, generado y real para ello gráfíquelos en un mismo plano.
13. Resuma los datos en las tablas 1.2, 1.3 y 1.4.
14. Grafique los puntos carga H vs Q según tabla 1.4.
15. Conclusiones.
16. Bibliografía.

Tabla 1.2. Datos calculados

No.	Carga H (cm)	Caudal observado Q (l/s)	$Y = \log Q$	$X = \log H$	$m = n$	$K = \log^{-1}(b)$	Esquema vertedero

Tabla 1.3. Datos calculados continuación

Tipo de vertedero:					Dimensiones:				
<i>No</i>	<i>Q_{obs}</i> (l/s)	<i>H</i> (cm)	<i>Ecuación Empleada Q_{gen} (l/s)</i>	<i>Q_{gen}</i> (l/s)	% error	<i>Q_{teorico}</i> (l/s)	<i>C_{di}</i>	<i>C_{dprom}</i>	<i>Q_{teo corregido}</i> (l/s)

Tabla 1.4. Cuadro comparativo de caudales

<i>No</i>	<i>H</i> (cm)	<i>Q_{obs}</i> (l/s)	<i>Q_{gen}</i> (l/s)	<i>Q_{teorico}</i> (l/s)	<i>Q_{teo corregido}</i> (l/s)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sotelo G. Hidráulica general I, fundamentos. 1ra edición. México: Limusa/Noriega. 2007.
2. Chow VT., Hidráulica de los Canales Abiertos. 1ra edición. México: McGraw-Hill. 1994.
3. Duarte C. Arturo. Introducción a la Hidráulica de Canales. 4ta edición. Bogotá D. C: Facultad de Ingeniería Universidad Nacional. 2016.
4. Bos Marinus, Replogle John CA. Aforadores de caudal para canales abiertos. 1986;293. Available from: <http://content.alterra.wur.nl/Internet/webdocs/ilri-publicaties/publicaties/Pub38/pub38.pdf>
5. Marbello R. Manual prácticas de laboratorio de hidráulica. Editorial: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 2005.
6. Siguenza H. Analisis de problemas Hidráulicos, Tipos de Flujo y Estructuras de Aforo mediante la Construcción de Seis equipos experimentales en el canal de pendiente variable - UPAO. 2017;1–305. Available from: <https://hdl.handle.net/20.500.12759/5732>
7. French. R. H. Hidráulica de Canales Abiertos. 1ra edición. México: McGraw-Hill. 1988.
8. Gálvez E y Camacho W. Modernización de la enseñanza aprendizaje en la asignatura de hidráulica II Tesis de grado. Bolivia: Universidad Mayor de San Simón Facultad De Ciencias y Tecnología. 2006.
9. Manual de laboratorio universidad del Cauca. Popayán: facultad de ingeniería departamento de hidráulica.

10. Chereque W. Mecánica de fluidos 2. Lima Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. 1987.
11. Villón M. Hidráulica de canales. 2da edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 2007.
12. Mott RL. Mecánica de fluidos. 6a. edición, 1a. reimpresión. México: Pearson educación. 2006.

PRÁCTICA 2: ESTUDIO Y PATRONAMIENTO DE VERTEDEROS DE PARED GRUESA (RECTANGULAR REDONDO Y TIPO CRUMP)

OBJETIVOS

- ✓ Observar el comportamiento de los vertederos como estructuras hidráulicas concebidas para el control de niveles y medición de caudales.
- ✓ Definir la ecuación de patronamiento teórico – práctica de un vertedero de pared gruesa.
- ✓ Determinar la utilización óptima de un vertedero de acuerdo a sus características.

GENERALIDADES

En los vertederos de pared gruesa o de cresta ancha se presenta que $e/H > 0.67$, así la lámina vertiente se adhiere a la cresta del vertedero, ver figura 2.1.

Flujo a través de vertederos de cresta ancha

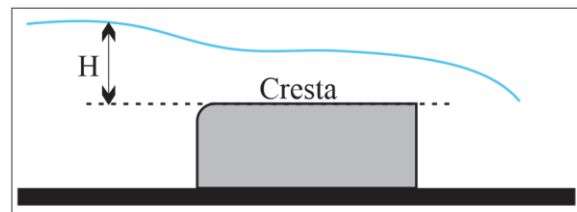


Figura 2.1. Flujo a través de vertederos de cresta ancha

Estos vertederos tienen menor capacidad de descarga para igual carga de agua que los vertederos de cresta delgada y su uso más frecuente es como estructuras de control de nivel, ver figuras 2.2 y 2.3.

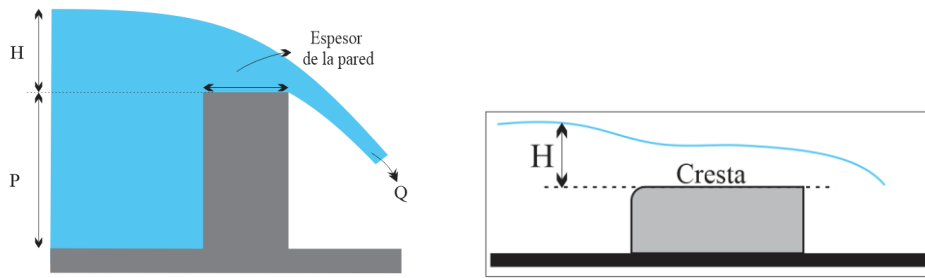


Figura 2.2. Vertederos de cresta ancha con descarga libre y sumergido

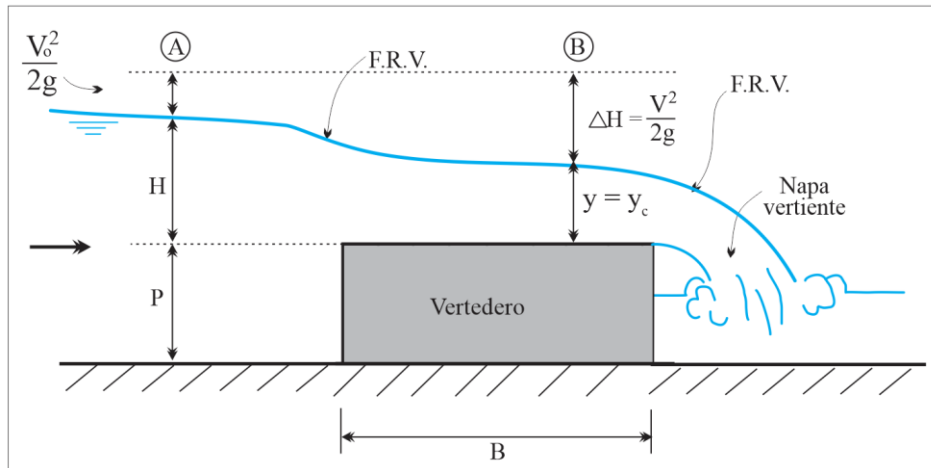


Figura 2.3. Vvertedero de cresta ancha

Sotelo (1982) presenta una clasificación del funcionamiento de los vertederos, según la relación e/H , como se detalla en la tabla 2.1:

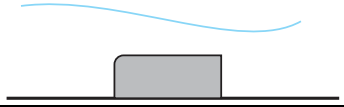
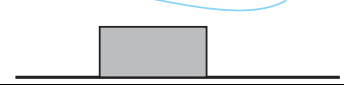
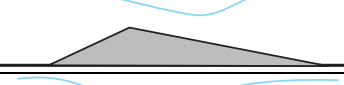
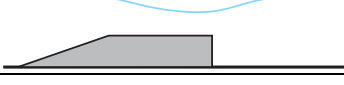
Tabla 2.1. Clasificación del funcionamiento de los vertederos, según la relación e/H

Relación e/H	Funcionamiento
Menor que 0.67	El chorro se separa de la cresta y es idéntico al del vertedero de pared delgada.
Mayor que 0.67	La lámina vertiente se adhiere a la cresta del vertedero.
Mayor que 10	Se considera que el funcionamiento es en canal.

En estos vertederos la fricción sobre la cresta produce una pérdida de carga considerable, por tal razón la longitud de la cresta en la dirección del flujo se debe tener en cuenta. Los vertederos de cresta ancha se pueden clasificar en triangulares o tipo Crump, rectangulares y trapeciales. En los vertederos tipo Crump el agua entra al canal y encuentra una rampa que la eleva y después una rampa en descenso, cuyas

pendientes son 1:2 y 1:1.5 respectivamente. Algunos vertederos de cresta ancha típicos se detallan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Tipos de perfil de vertederos de cresta ancha

Esquema	Nombre
	Vertedero de perfil rectangular redondo
	Vertedero de perfil rectangular recto
	Vertedero de perfil triangular
	Vertedero de perfil triangular
	Vertedero de perfil trapecial

Ecuaciones

A partir de la figura 2.3 y aplicando la ecuación de la energía se tiene que:

$$H + \frac{v_0^2}{2g} = y + \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

De donde la velocidad media en la cresta del vertedero es:

$$V = \sqrt{2g \left(H + \frac{v_0^2}{2g} - y \right)} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Antes del vertedero se debe producir un flujo subcrítico, después del vertedero un flujo supercrítico, por lo que en la cresta del vertedero se produce el flujo crítico, luego entonces la energía que se produce es la energía mínima, así:

$$y = y_c = \frac{2}{3} \left(H + \frac{v_0^2}{2g} \right) \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Por lo tanto, el caudal se define como:

$$Q = B y_c V = B \frac{2}{3} \left(H + \frac{V_0^2}{2g} \right) \left[\sqrt{2g \left(H + \frac{V_0^2}{2g} - y_c \right)} \right] \quad \text{Ecuación 2.4}$$

De donde:

$$Q = \sqrt{g} B y_c^{3/2} = 3.13 B y_c^{3/2} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

O también en función de la energía aguas arriba:

$$Q = \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} \sqrt{2g} B \left(H + \frac{V_0^2}{2g} \right)^{3/2} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Si la $V_0 = 0$, el caudal teórico es:

$$Q = \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} \sqrt{g} B H^{3/2} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

En el sistema métrico la ecuación se expresa como:

$$Q = 1.71 B H^{3/2} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde: H es la carga hidráulica y B es la longitud del vertedero rectangular redondo.

La descarga real del vertedero se obtiene introduciendo en la ecuación el coeficiente de descarga C_d .

$$Q = \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} C_d \sqrt{g} B H^{3/2} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$Q = 1.71 C_d B H^{3/2} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

En el caso del vertedero tipo Crump se utiliza la expresión:

$$Q = 3.132 B H^{3/2} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Mida las características geométricas de los vertederos.
2. Colocar el canal de pendiente variable en posición horizontal, es decir con una pendiente de fondo de canal igual a 0.
3. Instale el vertedero a estudiar en el canal (tipo Crump o rectangular redondo).
4. Alimente el canal con un caudal y mida simultáneamente la carga H y el caudal que circula por el canal Q_{obs} .
5. Cambie el caudal y repita los pasos 3 y 4.
6. Cambie el vertedero y repita los pasos desde el 1.
7. Consigne los datos en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Registro de datos tomados en el laboratorio

No de lectura	Carga H (cm)	Q_{obs} (l/s)	Longitud L (cm)	Esquema vertedero

INFORME

1. Calcule los logaritmos de los caudales observados y la carga hidráulica sobre el vertedero.
2. Grafique los puntos $\log H$ vs $\log Q$.
3. Tenga en cuenta la ecuación de la recta ($Y = mX + b$).
4. Establezca la línea de tendencia y obtenga la ecuación de la recta. Establezca los valores de K y de n . Recuerde que: $n = m$ y $K = \log^{-1}(b)$.
5. Defina la ecuación de patronamiento generada $Q = K H^n$.
6. Realice la comparación entre el caudal observado y el caudal con la ecuación generada.
7. Grafique los valores de los caudales calculados (H_i vs Q_{gen}).
8. Calcule el caudal $Q_{teorico}$. Utilice la ecuación del $Q_{teorico}$ de acuerdo con el tipo de vertedero utilizado en la práctica (tipo Crump $Q = 3.132 B H^{3/2}$, rectangular redondo $Q = 1.71 B H^{3/2}$).

9. Grafique los valores Q_{obs} vs $Q_{teorico}$.
10. Obtenga el valor de $C_{di} = \frac{Q_{obs}}{Q_{teorico}}$ y el valor del $C_{dprom} = \sum_1^n \frac{C_{di}}{n}$.
11. Defina la ecuación para calcular el $Q_{teo-cor}$ de acuerdo con el vertedero que está empleando.
12. Compare los caudales observado, generado y real para ello gráfíquelos en un mismo plano.
13. Resuma los datos en la tabla 2.4 y 2.5.
14. Grafique los puntos carga H vs caudales Q según tabla 2.4.
15. Conclusiones.
16. Bibliografía.

Tabla 2.4. Datos calculados

No.	Carga H (cm)	Caudal observado Q (l/s)	$Y = \log Q$	$X = \log H$	$m = n$	$K = \log^{-1}(b)$	Esquema vertedero

Tabla 2.5. Datos calculados continuación

Tipo de vertedero:					Dimensiones:				
No	Q_{obs} (l/s)	H (cm)	Ecuación Empleada Q_{gen} (l/s)	Q_{gen} (l/s)	% error	$Q_{teorico}$ (l/s)	C_{di}	C_{dprom}	$Q_{teo corregido}$ (l/s)

Tabla 2.6. Cuadro comparativo de caudales

No	H (cm)	Q_{obs} (l/s)	Q_{gen} (l/s)	$Q_{teorico}$ (l/s)	$Q_{teo corregido}$ (l/s)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sotelo G. Hidráulica general I, fundamentos. 1ra edición. México: Limusa/Noriega. 2007.

2. Chow VT., Hidráulica de los Canales Abiertos. 1ra edición. México: Mcgraw-Hill. 1994.
3. Marbello R. Manual prácticas de laboratorio de hidráulica. Editorial: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 2005.
4. Siguenza H. Analisis de problemas Hidráulicos, Tipos de Flujo y Estructuras de Aforo mediante la Construcción de Seis equipos experimentales en el canal de pendiente variable - UPAO. 2017;1–305. Available from: <https://hdl.handle.net/20.500.12759/5732>
5. Chow VT., Hidráulica de los Canales Abiertos. 1ra edición. México: Mcgraw-Hill. 1994.
6. Chereque W. Mecánica de fluidos 2. Lima Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. 1987.
7. Villón M. Hidráulica de canales. 2da edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 2007.
8. Azevedo N., J. M. y Acosta A., G., Manual de Hidráulica. Sexta edición. México: Harla, S. A. de C. V. 1975.

PRÁCTICA 3: CANALETA PARSHALL

OBJETIVOS

- ✓ Observar el comportamiento del flujo a través de una canaleta Parshall.
- ✓ Definir la ecuación de patronamiento de la canaleta Parshall, relacionando el caudal con la profundidad en la primera sección de la canaleta.
- ✓ Calcular la profundidad crítica y verificar en que punto de la canaleta se presenta.
- ✓ Comparar las curvas “q” vs “y” teórica y experimental del flujo a través de la canaleta.
- ✓ Graficar el perfil de la lámina de agua presentado en la canaleta.

GENERALIDADES

El aforador Parshall, llamado así por el nombre del ingeniero de regadío estadounidense que lo concibió, se describe técnicamente como un canal Venturi o de onda estacionaria o de un aforador de profundidad crítica.

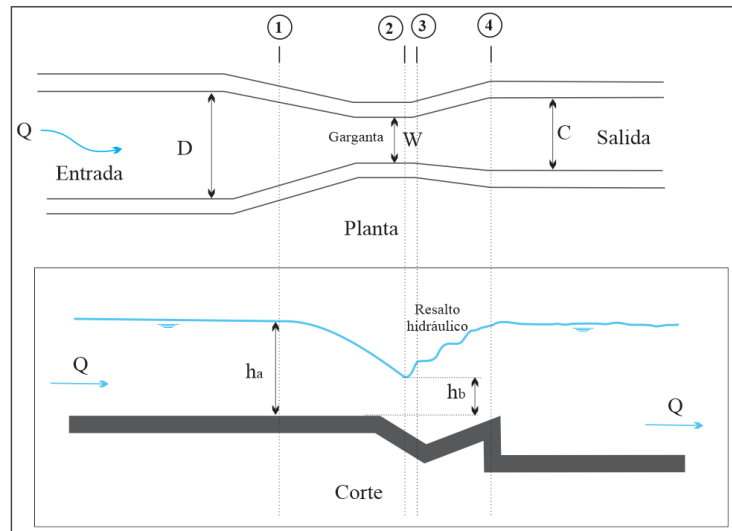


Figura 3.1. Canal de aforo Parshall

Tomado de http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358040/Contenido_en_linea_Diseño_de_Plantas_Potabilizadoras/fig_36.png

Donde h_a es la altura de la lámina de agua en la sección 1 aguas arriba de la garganta, h_b es la altura de la lámina de agua al final de la garganta, W es el ancho de la canaleta en la garganta.

Zonas de la canaleta Parshall

☐ De entrada	fondo horizontal	convergente
☐ Central (garganta)	fondo inclinado	paralelo
☐ De salida	fondo pendiente adversa	divergente

Funcionamiento

Al entrar el agua, debido a que su sección se va reduciendo, la velocidad va aumentando, al llegar a la cresta del medidor se precipita debido al descenso en el piso de la canaleta, al salir de la garganta empieza a perder velocidad dando origen a un resalto hidráulico cerca del extremo inferior de la garganta. Si la canaleta es colocada al final de un canal, a pesar de que en la zona convergente la pendiente de fondo sea positiva, es muy posible que el flujo sea supercrítico. Si existe algún control en la descarga se presentará un resalto hidráulico, así sea ahogado. Esta última condición se ha utilizado para que la canaleta se emplee, como dispositivo de mezcla rápida. En este caso la efectividad de la mezcla deberá asociarse con la energía disipada en el resalto.

Con un flujo libre el nivel del agua en la salida no es lo bastante elevado como para afectar el caudal a través de la garganta y, en consecuencia, el caudal es proporcional al nivel medido en el punto especificado en la sección de convergencia. Por sus características geométricas, la canaleta Parshall, además de permitir el arrastre de sedimentos en el canal, crea unas condiciones de régimen crítico en la garganta de la misma.

Para que la canaleta pueda utilizarse como mezclador rápido debe cumplir los siguientes requisitos:

- ☐ No debe trabajar ahogada: para ello el valor de la relación h_b/h_a debe estar comprendido entre 0.60 y 0.80.
- ☐ La relación h_a/W debe estar entre 0.40 y 0.80.
- ☐ El número de Froude en la salida de la garganta debe estar entre 1.7 a 2.5 o 4.5 a 9.0, para evitar resaltos inestables cambiando la posición y dificultando el punto de aplicación del coagulante.

Principales ventajas

- ☐ Solo existe una pequeña pérdida de carga a través del aforador.
- ☐ Deja pasar fácilmente sedimentos o desechos, que no necesita condiciones especiales de acceso o una poza de amortiguación.

La relación del nivel del agua aguas abajo h_b con el nivel aguas arriba h_a se conoce como el grado de sumersión ($S = \frac{h_b}{h_a}$); una ventaja del canal de aforo Parshall es que no requiere corrección alguna hasta un 70% de sumersión.

Clasificación de los medidores Parshall

Pueden ser:

- ☐ Descarga libre

El flujo descarga libremente como se indica en la figura 3.2.

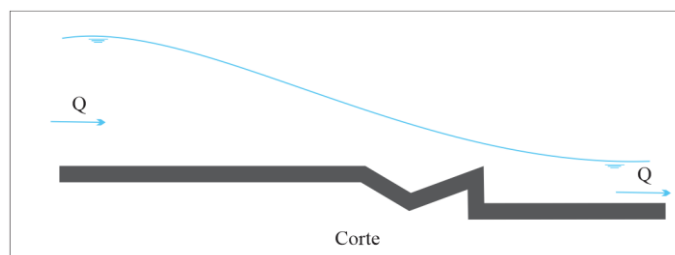


Figura 3.2. Canaleta Parshall con descarga libre

❑ Descarga sumergida

El nivel del flujo aguas abajo tiene influencia en el flujo del medidor, ver figura 3.3.

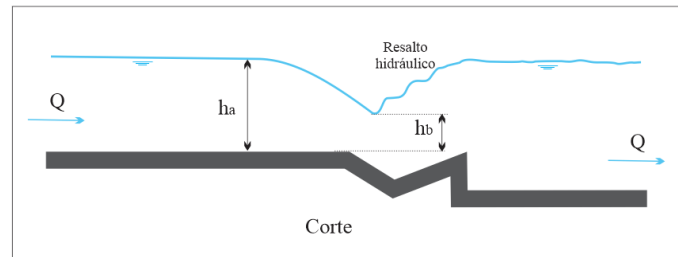


Figura 3.3. Canaleta Parshall con descarga ahogada

Ecuaciones

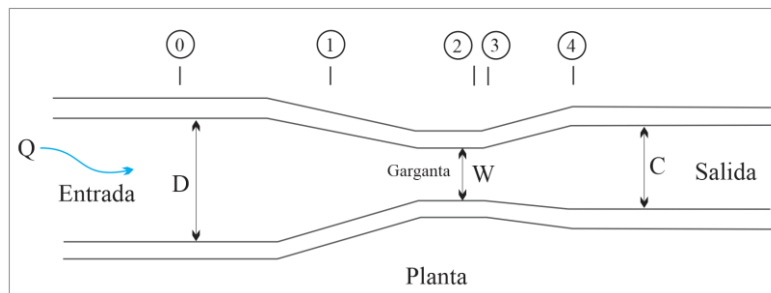


Figura 3.4. Secciones de la canaleta Parshall

La ecuación general de las canaletas Parshall viene dada por la expresión:

$$Q = K H^n \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Los valores típicos según el ancho de la garganta de la canaleta Parshall se encuentran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de coeficiente K y exponente n

W		K		
SI	m	n	Unidades métricas	Unidades inglesas
3"	0.076	1.547	0.176	0.992
6"	0.152	1.580	0.381	2.060
9"	0.229	1.530	0.535	3.070
1'	0.305	1.522	0.690	4.000
1 1/2'	0.457	1.538	1.054	6.000
2'	0.610	1.550	1.426	8.000
3'	0.915	1.566	2.182	12.000
4'	1.220	1.578	2.935	16.000

W		K		
SI	m	n	Unidades métricas	Unidades inglesas
5´	1.525	1.587	3.728	20.000
6´	1.830	1.595	4.515	24.000
7´	2.135	1.601	5.306	28.000
8´	2.440	1.606	6.101	32.000

Fuente: Manual de Hidráulica Azevedo y Acosta

Tabla 3.2. Diseños estándar de aforadores Parshall, características hidráulicas

Ancho de la garganta (cm)	Coeficientes	
	m	n
2.50	0.0604	1.550
5.00	0.1207	1.550
7.60	0.1771	1.550
15.00	0.3812	1.580
22.50	0.5354	1.530
30.50	0.6009	1.520
45.50	1.0560	1.538
61.00	1.4280	1.550
91.50	2.1840	1.566
122.00	3.9530	1.578
152.50	3.7320	1.587
183.00	4.5190	1.595
213.50	5.3120	1.601
244.00	6.1120	1.607

Fuente: IMTA – Manual de estructuras de aforo

La velocidad en la sección cero (0) viene dada por la expresión:

$$V_0 = \frac{Q}{H_0 D}$$

Ecuación 3.2

PROCEDIMIENTO

1. Divida la canaleta Parshall en 15 secciones, márquelas y tome las distancias entre ellas (h_a y h_b deben estar incluidos dentro de los tramos seleccionados).
2. Introduzca la canaleta dentro del C.P.V.
3. Mida las cotas Z_1 , Z_2 y la longitud entre ellas, esto con el objetivo de determinar la pendiente longitudinal del C.P.V.
4. Alimente el canal con un caudal y mida simultáneamente las alturas en cada sección y el caudal.
5. Mida las diferentes profundidades y distancia a lo largo de la canaleta donde realizó las marcas. Cambie de caudal y registre los datos en la tabla 3.2.

Tabla 3.3. Registro de datos tomados en el laboratorio

H (cm)	Distancia (cm)	W_i (cm)	Z_1 (cm)	Z_2 (cm)	L_{canal} (cm)	Q_{obs} (l/s)

INFORME

1. Grafique los puntos Q_{obs} vs H . Tenga en cuenta la ecuación de la recta ($Y = mX + b$).
2. Establezca la línea de tendencia y obtenga la ecuación de la recta. Establezca los valores de K y de n . Recuerde que $n = m$ y $K = \log^{-1}(b)$
3. Defina la ecuación de patronamiento generada $Q = K H^n$ y con ella calcule los caudales generados.
4. Calcule el % de error con la ecuación: $\%E = \frac{Q_{gen} - Q_{obs}}{Q_{gen}}$.
5. Calcule el caudal teórico (use los valores de K y n registrados en la tabla 4.2), los coeficientes de descarga $C_{di} = \frac{Q_{obs}}{Q_{teo}}$, el coeficiente de descarga promedio $C_{dprom} = \sum_1^n \frac{C_{di}}{n}$ y el caudal teórico corregido $Q_{teo\ corregido} = C_d Q_{teorico}$.
6. Calcule el área en cada sección por ejemplo en la zona de convergencia seria $A = H_o D$.
7. Calcule la velocidad en cada sección con la ecuación $V = \frac{Q_{obs}}{A}$.
8. De igual forma calcule el número de Froude $F_r = \frac{V}{\sqrt{g y}}$ y determine el tipo de flujo (subcrítico, crítico y supercrítico).
9. Calcular el grado de sumergencia de la canaleta $S = \frac{h_b}{h_a}$.
10. Calcular la energía específica $E = y + \frac{Q^2}{2 g A^3}$.
11. Grafique las alturas de la lámina de agua vs la longitud de la canaleta.
12. Grafique las alturas de la lámina de agua vs la velocidad.
13. Realice la comparación entre los caudales.
14. Construya la gráfica y vs E .
15. Observaciones.

16. Conclusiones.

17. Bibliografía.

Tabla 3.3. Datos calculados

<i>No.</i>	<i>Carga H (cm)</i>	<i>Q_{obs} (l/s)</i>	<i>Y = log Q</i>	<i>X = log H</i>	<i>m = n</i>	<i>K = log⁻¹(b)</i>

Tabla 3.4. Registro de datos calculados - continuación

<i>Carga H (cm)</i>	<i>Q_{obs} (l/s)</i>	<i>Ecuación generada (l/s)</i>	<i>Q_{gen} (l/s)</i>	<i>% E</i>	<i>Q_{teorico}</i>	<i>C_{dt}</i>	<i>C_{dprom}</i>	<i>Q_{teo corregido} (l/s)</i>	<i>A (cm²)</i>	<i>V (cm/s)</i>	<i>F_r</i>	<i>Tipo de flujo</i>	<i>S</i>	<i>E (cm)</i>

Tabla 3.5 Cuadro comparativo de caudales

<i>No</i>	<i>H (cm)</i>	<i>Q_{obs} (l/s)</i>	<i>Q_{gen} (l/s)</i>	<i>Q_{teorico} (l/s)</i>	<i>Q_{teo corregido} (l/s)</i>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ballén Suárez JA, Galarza García MÁ, Ortiz Mosquera RO. Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. Int Symp Hydraul Struct - XXII Congr Latinoam Hidraul. 2006
1. Skertchly L. Manual de diseño de estructuras de aforo. 1988;65. Available from: http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/825/IMTA_013.pdf?sequence=1&isAllowed=y
2. Sotelo G. Hidráulica general I, fundamentos. 1ra edición. México: Limusa/Noriega. 2007.
3. Gaona L. Cálculo de la longitud mínima de aproximación para una canaleta parshall, a través de la comparación del comportamiento hidráulico entre un modelo numérico y un modelo físico. J Chem Inf Model. 2019;53(9):1689–99
4. Giles RV. Mecánica de los fluidos e hidráulica. 3da edición. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.; 1994.
5. Marbello R. Manual prácticas de laboratorio de hidráulica. Editorial: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 2005.
6. Rodríguez HA. Hidráulica experimental. 1ra edición quinta reimpresión. Bogotá: escuela colombiana de ingeniería. 2009.
7. Trueba S. Hidráulica. 16ta impresión. México: compañía editorial continental. 1978.
8. Mott RL. Mecánica de fluidos. 6a. edición, 1a. reimpresión. México: Pearson educación. 2006.
9. Savage, B., Heiner, B., & Barfuss, S. Parshall flume discharge correction coefficients through modelling, Institution of Civil Engineers publishing.167,279-287. 2013.
10. Pedroza-González, Edmundo, and Jorge Leonel Ángel-Hurtado. 2012. “Variaciones En La Calibración de Un Aforador Parshall.” Tecnología y Ciencias Del Agua 3(3):35–52
11. Bureau Of Reclamation: Managing Water in the West. (1997). USBR Water Measurement, Chapter 8. Section10. Parshall Flumes, de Chapter 8-FLUMES. Disponible en: https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/chap08_10.html
12. Cimbala, J. M., & Cengel, Y. A. (2001). Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. McGrawHill, Primera Ed, 10–11.

PRÁCTICA 4: CANALETA VENTURI

OBJETIVOS

- ✓ Observar el comportamiento del flujo a través de una canaleta Venturi.
- ✓ Definir la ecuación de patronamiento de la canaleta Venturi, relacionando el caudal con la profundidad en la primera sección de la canaleta.
- ✓ Calcular la profundidad crítica y verificar en que punto de la canaleta se presenta.
- ✓ Comparar las curvas “q” vs “y” teórica y experimental del flujo a través de la canaleta.
- ✓ Graficar el perfil de la lámina de agua presentado en la canaleta.

GENERALIDADES

La canaleta Venturi es una canaleta que presenta un estrechamiento en el ancho, con lo cual se produce un estrangulamiento del flujo y el establecimiento del estado crítico del mismo, en la parte más estrecha de la canaleta (garganta), ver figura 4.1. Esta situación se aprovecha para deducir una expresión teórica que permita determinar el caudal del flujo a través de la canaleta. Por esta razón la canaleta Venturi es un medidor de caudales para flujo en canales abiertos, y su nombre obedece a la similitud geométrica que guarda con el tubo Venturi, el cual se emplea para medir caudales en tuberías. Adicionalmente, el aforador Venturi no tiene riesgo por sedimentación y esto le da un grado de ventaja sobre los demás aforadores.

Zonas de la canaleta Venturi

☐ De entrada	fondo horizontal	convergente
☐ Central (garganta)	fondo horizontal	paralelo
☐ De salida	fondo horizontal	divergente

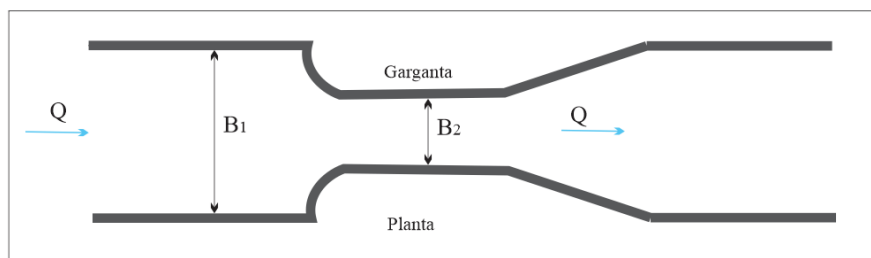


Figura 4.1. Canaleta Venturi (vista en planta)
Tomado de Manual de Laboratorio de Hidráulica. Ramiro Marbello Pérez

Clasificación de los medidores Venturi

Pueden ser:

- ☐ Descarga libre

El flujo descarga libremente como se indica en la figura 4.2.

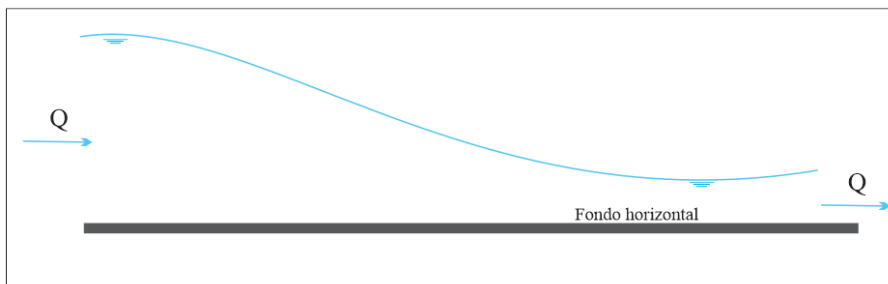


Figura 4.2. Canaleta Venturi con descarga libre (perfil)
Tomado de Manual de Laboratorio de Hidráulica. Ramiro Marbello Pérez

- ☐ Descarga sumergida

El nivel del flujo aguas abajo tiene influencia en el flujo del medidor, ver figura 5.3.

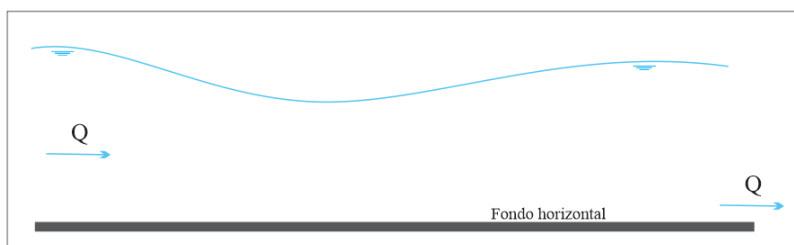


Figura 4.3. Canaleta Venturi con descarga ahogada
Tomado de Manual de Laboratorio de Hidráulica. Ramiro Marbello Pérez

Ecuaciones

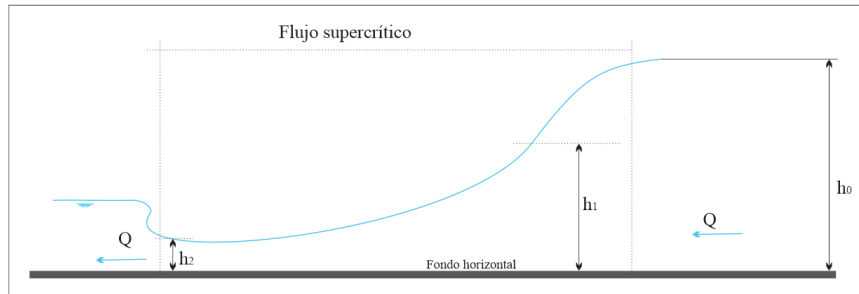


Figura 4.4. Sección representativa para el cálculo del caudal en el canal de aforo Venturi
Tomado de Zuikov & Bakunyaeva, 2018

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre la sección 0 y la 1, se tiene:

$$h_0 + \frac{V_0^2}{2g} = h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$V_0 = \frac{Q}{B_0 h_0} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

$$V_1 = \frac{Q}{B_1 h_1} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

De lo anterior, se puede suponer que $V_0 \ll V_1$, ya que $B_0 > B_1$ y $h_0 > h_1$, por lo tanto, la componente de la energía cinética del flujo en la sección 0 es pequeña en comparación con la energía cinética del flujo en la sección 1, ello implica que:

$$\frac{\alpha V_0^2}{2g} \approx 0$$

Asumiendo que el valor del Coeficiente de Coriolis es 1, y reemplazando $Q = V A$, se tiene que:

$$h_0 - h_1 = \frac{V_1^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g A^2} = \frac{Q^2}{2g (B_1 h_1)^2} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Despejando el caudal:

$$Q = \sqrt{2g (h_0 - h_1) (B_1 h_1)^2} = B_1 h_1 \sqrt{2g (h_0 - h_1)} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Otra forma de expresar el caudal en una canaleta Venturi es:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} C_d C_v \sqrt{g} B_0 h_0^{1.5} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Experimentalmente los coeficientes C_d se puede calcular con la siguiente expresión matemática:

$$C_d = \left(1 - 0.006 \frac{l}{B_1}\right) \left(1 - 0.003 \frac{l}{h_0}\right) \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde l es el largo de la canaleta y C_v se puede establecer con base a los valores de la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Valores de C_v según el apéndice de RF State Standar

$C_d \frac{B_1}{B_0}$	C_v	$C_d \frac{B_1}{B_0}$	C_v
0.10	1.002	0.45	1.050
0.15	1.005	0.50	1.064
0.20	1.009	0.55	1.079
0.25	1.014	0.60	1.098
0.30	1.021	0.65	1.120
0.35	1.029	0.70	1.147
0.40	1.039	-	-

El cálculo del caudal teórico también se puede hacer con las ecuaciones:

$$Q = \mu C B_1 \sqrt{g} h_0^{1.5} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

$$Q = 0.04429 \mu B_2 h_0^{3/2} \text{ (l/s)} \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Donde μ es el coeficiente de salida para la canaleta Venturi cuyo valor es de 0.985, o se puede también calcular con la ecuación 4.9; C es el coeficiente para la contracción, B_1 ancho de la canaleta en la contracción altura en el canal de entrada y g la aceleración de la gravedad.

$$\mu = 0.38 + 0.106 \left(\frac{B_2 h_0}{A} \right)^2 \quad \text{Ecuación 4.10}$$

Donde: B_2 es el ancho en la sección más estrecha de la canaleta Venturi, h_0 es la carga hidráulica al inicio del aforador y A es el área al inicio del aforador ($A = B_1 h_0$).

PROCEDIMIENTO

1. Divida la canaleta Venturi en 15 secciones, márquelas y tome las distancias entre ellas (h_a y h_b deben estar incluidos dentro de los tramos seleccionados).
2. Introduzca la canaleta dentro del C.P.V.
3. Mida las cotas Z_1 , Z_2 y la longitud entre ellas, esto con el objetivo de determinar la pendiente longitudinal del C.P.V., la cual debe estar en 0.
4. Alimente el canal con un caudal y mida simultáneamente las alturas en cada sección y el caudal.
5. Mida las diferentes profundidades a lo largo de la canaleta donde realizó las marcas, cambie de caudal y registre los datos en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Registro de datos tomados en el laboratorio

H (cm)	Distancia (cm)	W_i (cm)	Z_1 (cm)	Z_2 (cm)	L_{canal} (cm)	Q_{obs} (l/s)

INFORME

1. Grafique los puntos Q_{obs} vs H . Tenga en cuenta la ecuación de la recta ($Y = mX + b$).

2. Establezca la línea de tendencia y obtenga la ecuación de la recta. Establezca los valores de K y de n . Recuerde que $n = m$ y $K = \log^{-1}(b)$.
3. Defina la ecuación de patronamiento generada $Q = K H^n$ y con ella calcule los caudales generados.
4. Calcule el % de error con la ecuación: $\%E = \frac{Q_{gen} - Q_{obs}}{Q_{gen}}$.
5. Calcule el caudal teórico, los coeficientes de descarga $C_{di} = \frac{Q_{obs}}{Q_{teo}}$, el coeficiente de descarga promedio $C_{dprom} = \sum_1^n \frac{C_{di}}{n}$ y el caudal teórico corregido $Q_{teo\ corregido} = C_d Q_{teorico}$.
6. Calcule el área en cada sección por ejemplo en la zona de convergencia seria $A = H_o D$.
7. Calcule la velocidad en cada sección con la ecuación $V = \frac{Q_{obs}}{A}$.
8. De igual forma calcule el número de Froude $F_r = \frac{V}{\sqrt{g y}}$ y determine el tipo de flujo (subcrítico, crítico y supercrítico).
9. Verificar la presencia del régimen crítico y su ubicación.
10. Calcular el grado de sumergencia de la canaleta $S = \frac{h_b}{h_a}$.
11. Calcular la energía específica $E = y + \frac{Q^2}{2 g A^3}$.
12. Grafique las alturas de la lámina de agua vs la longitud de la canaleta.
13. Grafique las alturas de la lámina de agua vs la velocidad.
14. Realice la comparación entre le caudal real y el caudal generado.
15. Construya la gráfica y vs E .
16. Observaciones.
17. Conclusiones.
18. Bibliografía.

Tabla 4.3. Datos calculados – canaleta Venturi

No.	Carga H (cm)	Q_{obs} (l/s)	$Y = \log Q$	$X = \log H$	$m = n$	$K = \log^{-1}(b)$

Tabla 4.4. Registro de datos calculados canaleta Venturi - continuación

<i>Carga H (cm)</i>	<i>Q_{obs} (l/s)</i>	<i>Ecuación generada (l/s)</i>	<i>Q_{gen} (l/s)</i>	<i>% E</i>	<i>Q_{teorico}</i>	<i>C_{dt}</i>	<i>C_{dprom}</i>	<i>Q_{teo corregido} (l/s)</i>	<i>A (cm²)</i>	<i>V (cm/s)</i>	<i>F_r</i>	<i>Tipo de flujo</i>	<i>S</i>	<i>E (cm)</i>

Tabla 4.5 Cuadro comparativo de caudales – canaleta Venturi

<i>No</i>	<i>H (cm)</i>	<i>Q_{obs} (l/s)</i>	<i>Q_{gen} (l/s)</i>	<i>Q_{teorico} (l/s)</i>	<i>Q_{teo corregido} (l/s)</i>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Marbello R. Manual prácticas de laboratorio de hidráulica. Editorial: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 2005.
2. Domínguez FJ. Hidráulica. 6ta edición. Santiago de Chile: Editorial universitaria. 1999.
3. Manual de laboratorio universidad del Cauca. Popayán: facultad de ingeniería departamento de hidráulica.
4. Rodríguez HA. Hidráulica experimental. 1ra edición quinta reimpresión. Bogotá: escuela colombiana de ingeniería. 2009.
1. French. R. H. Hidráulica de Canales Abiertos. 1ra edición. México: McGraw-Hill. 1988.
5. Zuikov AL, Bakunyaeva V V. Analytical Method of the Hydraulic Calculation of the Flow Rate of a Venturi Channel. Power Technol Eng. 2018.