

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**Desarrollo de un modelo Hidráulico a escala de un
Canal para implantar un Laboratorio en la
Universidad San Francisco de Quito**

Stephanie Alexandra Almeida Cruz

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención
del título de Ingeniero Civil

Quito, diciembre de 2009

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio Politécnico

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Desarrollo de un modelo Hidráulico a escala de un
Canal para implantar un Laboratorio en la
Universidad San Francisco de Quito**

Stephanie Almeida

Miguel Araque, Ing.
Director de Tesis y
Miembro del Comité de Tesis

.....

Fernando Romo P., Ing.
Decano del Colegio Politécnico

.....

Quito, diciembre de 2009

© **Derechos de autor:**

Stephanie Almeida

2009

Según la actual Ley de Propiedad Intelectual, Art. 5: “el derecho de autor nace y se protege por el solo hecho de la creación de la obra, independientemente de su mérito, destino o modo de expresión. El reconocimiento de los derechos de autor y de los derechos conexos no está sometido a registro, depósito, ni al cumplimiento de formalidad alguna.” (Ecuador. Ley de Propiedad Intelectual, Art. 5)

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme durante todos los años de mi vida; a mis profesores por brindarme sus conocimientos y experiencias que me servirán en mi futuro profesional, sobre todo al Ing. Miguel Araque quien nos apoyó en el proceso de desarrollo del proyecto de tesis; a mis padres quienes han sido mi guía para formarme como persona, a mi familia en general por siempre creer en mí y compartir momentos de alegría.

RESUMEN

Este proyecto denominado “Desarrollo de un modelo Hidráulico a escala de un Canal para implantar un Laboratorio en la Universidad San Francisco de Quito” remarca como prioridad la implementación de modelos hidráulicos conjuntamente con la elaboración de prácticas de laboratorio con fines pedagógicos para los estudiantes de Ingeniería Civil. En el estudio del canal hidráulico se analizará el comportamiento del agua con los varios tipos de vertederos y la diferencia que existe entre ellos, con esto se realizará el cálculo del caudal en cada uno de los casos. Se verificará la igualdad del alcance del agua al pasar por dos orificios que se encuentran a diferentes alturas.

ABSTRACT

The Project “Development of a scaled Hydraulic flume for implementing a Laboratory in San Francisco de Quito University” has like a priority the implementation of hydraulic models and the elaboration of laboratory practices with a pedagogic approach for the Civil Engineering students. In the study of the hydraulic channel will be analyzed the behavior of the water with various weirs and the difference between them, with this the flow can be calculated in all of the situations. In addition, the equality of the discharge’s distance of the water that goes through two holes at different heights will be verified.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e Importancia del Proyecto	2
1.2.1 Justificación técnica de un modelo	3
1.2.2 Justificación del costo de un modelo	3
1.3 Objetivo General del Proyecto	4
1.4 Objetivos Específicos del Proyecto	4

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción	5
2.2 Similitud Hidráulica	6
2.2.1 Importancia de la Similitud	6
2.2.2 Similitud Geométrica	7
2.2.3 Similitud Cinemática	8
2.2.4 Similitud Dinámica	8
2.3 Condiciones de Similitud	8
2.3.1 Similitud de Euler	9
2.3.2 Similitud de Reynolds	10
2.3.3 Similitud de Froude	12
2.4 Clasificación de modelos hidráulicos	13

2.4.1	Modelo de fondo fijo	14
2.4.2	Modelo de fondo móvil	14
2.5	Escala en modelos hidráulicos	14

CAPÍTULO III: ESTUDIOS EN EL MODEL HIDRÁULICO

3.1	Estudio en un modelo	16
3.2	Vertederos de Pared Delgada	16
3.2.1	Aspectos Generales	17
3.2.2	Teorema de Torricelli	20
3.2.3	Flujo Libre	21
3.3	Descripción del canal y Características del flujo	22
3.3.1	Mediciones en el Canal Hidráulico	23
3.3.1.1	Consideraciones importantes en los vertederos	26
3.3.2	Lámina vertiente	28
3.4	Orificios de pared delgada	30
3.4.1	Características	30
3.4.2	Igualdad en el alcance de dos chorros ubicados a diferentes alturas	32

CAPÍTULO IV: PROCEDIMIENTO DE TOMA DE DATOS

4.1 Desarrollo Hidráulico del Vertedero Triangular de Pared Delgada	
4.1.1 Características	35
4.1.2 Evaluación de la descarga	37
4.1.2.1 Vertedero Triangular con contracción completa	39
4.1.2.2 Vertedero Triangular con contracción parcial	40
4.2 Desarrollo Hidráulico del Vertedero Rectangular de Pared Delgada	
4.2.1 Características	41
4.2.2 Evaluación de la descarga	45
4.3 Vertedero Trapezoidal o Cipolletti	
4.3.1 Características	49
4.3.2 Evaluación de la descarga	51
4.4 Orificios a flujo libre	
4.4.1 Características	52
4.4.2 Evaluación de la descarga	52

CAPÍTULO V: RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Resultados obtenidos	53
5.2 Conclusiones	55
5.3 Recomendaciones	56
REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	57

PRÁCTICAS DE LABORATORIO	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
TERMINOLOGÍA	96

TABLA DE FIGURAS Y GRÁFICOS

Figura 1: Flujo de agua sobre una cresta de un vertedero de pared delgada	18
Figura 2. Definiciones de un vertedero	19
Figura 3. Vertederos. a) Rectangular; b) Triangular; c) Trapecial	20
Figura 4. Medición altura de carga del vertedero h	26
Figura 5. Forma de Vena Líquida	29
Figura 6. Orificio en Pared Delgada	31
Figura 7. Alcance de dos chorros. Estudio y patronamiento de orificios	32
Figura 8. Vertedero Triangular de Pared Delgada	36
Figura 9. Vertedero a) sin contracción lateral b) con contracción lateral	42
Figura 10. Vertedero Rectangular de Pared Delgada	44
Figura 11. Vertedero Trapezoidal o Cipolletti	50
Gráfico 1. Value of K_h as a function of the notch angle	38
Gráfico 2. Coefficient of discharge C_d as a function of notch angle	40
Gráfico 3. Coefficient of discharge C_d as a function of h_l/p_l and p_l/B	41
Gráfico 4. Coefficient of discharge C_d as a function of the ratios b/B , and h/p	46
Gráfico 5. Values of K_b as a function of b/B	47
Tabla 1. Coefficient of discharge C_d as a function of b/B y h/p	47
Tabla 2. Resultados de las prácticas en el laboratorio	54

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.5 Antecedentes

La Hidráulica es una rama de la Ingeniería Civil que se dedica al estudio del comportamiento de las propiedades de los fluidos. Desde épocas antiguas, el hombre tuvo que realizar obras hidráulicas para aprovechar el flujo inconstante de los ríos. Cada una de estas obras se construía de la experiencia y errores de las anteriores, por lo que los proyectos no tenían el diseño más óptimo para aprovechar los recursos hídricos.

Actualmente, esta ciencia se estudia mediante soluciones matemáticas y modelos hidráulicos los cuales nos ayudan a comprender de una mejor manera el comportamiento de los fluidos. Con la incursión de computadoras y el desarrollo de métodos de cálculo se han podido desarrollar modelos que puedan simular el comportamiento del agua de una estructura hidráulica y así nos lleva a tener resultados mejores e innovadores para el diseño y la construcción.

Los fenómenos hidráulicos son complejos por lo cual no es posible analizarlos y describirlos totalmente. Por lo que la construcción de modelos ha permitido el progreso de la ciencia en muchos aspectos, como verificar que los diseños reales sean los más adecuados y que cumplan con las funciones apropiadas. Se dice que “hacer ciencia es construir modelos.” Al tener un modelo para estudiar y analizar las diferentes variables podemos descubrir nuevas

opciones y utilizar las mejores. Este proyecto será de gran ayuda para el aprendizaje de los alumnos, ya que los métodos matemáticos que se utilizan para resolver problemas de la vida real son complejos, por lo tanto es más fácil visualizarlos experimentalmente.

1.6 Justificación e Importancia del Proyecto

El agua es fuente de vida y para que ésta sea aprovechada para los diferentes usos, debe ser transportada a los lugares apropiados para su distribución; esta conducción del agua se la realiza por medio de canales. Por ende este tipo de estructura hidráulica es de vital importancia para el desarrollo de las ciudades y países. Sobre todo para nuestro país, donde es necesario realizar grandes obras hidráulicas para el beneficio de la comunidad.

Este proyecto nos va ayudar a tener un mejor conocimiento de la materia de Hidráulica que también está relacionada con la Mecánica de Fluidos; al mejorar la forma de aprendizaje nos beneficiará para alcanzar conceptos y criterios más sólidos en este campo.

Es de gran ventaja tener un modelo a escala ya que los estudiantes podrán observar las diversas formas de construir un canal, las consideraciones que se deben tomar en cuenta en el diseño, su funcionamiento y beneficios para las obras hidráulicas. Tendrán un concepto claro de cómo se debería construir dicho proyecto en el caso de que sea necesario. Así mismo, nos permite el estudio y análisis de diversas condiciones de diseño, construcción y operación.

1.6.1 Justificación técnica de un modelo

El modelo nos da la ventaja de apreciar el funcionamiento del canal en tres dimensiones, lo que no sucede con las fórmulas que se emplean, ya que corresponden a modelos bidimensionales. En un modelo tridimensional se puede observar el comportamiento del flujo y sus variaciones, esto nos ayudará a tener una mejor apreciación en el funcionamiento del canal con los diversos vertederos.

Con este tipo de proyecto se pretende tener mejores resultados en el diseño, para que así los profesionales construyan obras eficientes, es decir proyectos durables y a su vez económicos. De esta manera, también se podrá evitar los riesgos de operación y ejecución, elevando el grado de seguridad. Con todas estas ventajas se pueden construir obras que sean de gran beneficio para la sociedad.

1.6.2 Justificación del costo de un modelo

Se debe considerar que obras de gran magnitud, como son las obras hidráulicas, representan una gran inversión en cuanto a recursos económicos. Por lo que un modelo, en el que se estudiará y verificará el diseño del proyecto futuro a construir, en cuanto a costo no es representativo. Más aún sería un ahorro a largo plazo, por la seguridad y durabilidad que tendrá la obra. Además, la experiencia demuestra que ciertas estructuras pueden ser igualmente eficientes y seguras, a un menor costo.

1.7 Objetivo General del Proyecto

Desarrollar un modelo a escala de un canal hidráulico con varios tipos de vertederos y orificios para implantar conjuntamente con otros proyectos de tesis un laboratorio de Ingeniería Hidráulica en la Universidad San Francisco de Quito.

1.8 Objetivos Específicos del Proyecto

- ✓ Realizar formatos para las prácticas del laboratorio de hidráulica.
- ✓ Analizar el comportamiento del agua con los diversos tipos de vertederos para el cálculo del caudal.
- ✓ Verificar la teoría de la igualdad del alcance de dos chorros de agua que pasan a través de dos orificios, ubicados a diferentes alturas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.6 Introducción

El modelo hidráulico es la esquematización de la realidad hecha con fines de estudio. Por lo que es una ayuda importante para el diseño de las obras hidráulicas difíciles de analizar por medio de un modelo matemático, siempre y cuando el diseño de un modelo reducido sea correcto, esté bien operado y los resultados sean interpretados con sentido crítico.

El modelo de la presente disertación es de simulación, es decir descriptivo ya que se analizan los diferentes condicionantes. Permite el análisis de riesgos, para la planificación y estudios de la construcción del canal hidráulico en el caso que sea necesario.

La investigación del modelo se realiza para mejorar las situaciones desfavorables existentes en el prototipo, es decir la estructura hidráulica al tamaño natural, o ayudar en el diseño de obras hidráulicas para encontrar una solución, sin riesgos de fallas completas o parciales, de las obras que se van a construir.

Canal Hidráulico es una construcción destinada al transporte de fluidos, generalmente utilizada para agua, y que a diferencia de las tuberías, es abierta a la atmósfera. Los canales tienen diferente forma geométrica como rectangular, circular, trapezoidal, secciones compuestas, etc. En este caso se realizará el estudio en un canal rectangular.

2.7 Similitud Hidráulica

Ya que el modelo simula a un objeto real llamado “prototipo” debe cumplir con la similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, con esto se comprueba que el diseño del canal hidráulico sea adecuado y los datos que obtenemos sean correctos para el estudio del mismo. Es decir el modelo a escala debe ser semejante al modelo real.

Es fundamental que el modelo tenga un comportamiento hidráulico semejante, no solo semejanza geométrica sino también semejanza cinética y dinámica, con respecto al prototipo para obtener resultados confiables. Con el cumplimiento de estas similitudes, se obtendrá información cuantitativa acertada de un estudio con un modelo.

2.7.1 Importancia de la similitud

Debido a la dificultad que presenta la solución de las ecuaciones establecidas en la teoría, frecuentemente se hacen hipótesis a fin de obtener una solución del problema planteado.

Existen problemas para los que la teoría no proporciona ayuda alguna, siendo la experiencia la única vía de investigación; por este motivo, se dice que la hidráulica es una ciencia tanto teórica como experimental.

La dificultad de la investigación experimental radica en la correcta interpretación y síntesis de los resultados obtenidos, particularmente cuando, como en la hidráulica, interviene un gran número de variables.

Una de las herramientas para la síntesis de resultados es la similitud mecánica, ya que si se definen los movimientos mecánicamente semejantes, y mediante el empleo de coeficientes adimensionales, se puede determinar la ley que rige al movimiento.

La teoría de la similitud permita hacer ensayos sobre modelos y referir los resultados obtenidos al dispositivo real (prototipo); para ello basta satisfacer las condiciones de similitud.

Frecuentemente, el modelo reproduce al prototipo a una escala geoméricamente reducida (ensayos hidráulicos, fluviales o marítimos); sin embargo, puede realizarse a una escala más grande. Asimismo en el modelo puede emplearse un fluido de más fácil manejo que el del prototipo.

2.7.2 Similitud Geométrica

Se debe cumplir la igualdad en dos objetos en la razón de sus dimensiones geométricas. Es decir la relación de longitud, área y volumen (similitud en la forma) deben ser homólogos. Esta similitud debe establecerse mediante una escala de longitudes como la razón entre el prototipo y el modelo.

Se establece que dos flujos son similares si son geoméricamente similares y si todos los parámetros adimensionales correspondientes son los mismos. Por ejemplo, si el modelo tiene un octavo del tamaño del prototipo en cualquier dimensión lineal, la altura de las proyecciones debe tener la misma relación.

2.7.3 Similitud Cinemática

Representa la proporcionalidad con respecto a un movimiento (velocidad) que se presentan en el modelo con las que se presentan en el prototipo. Se cumple cuando la relación de la velocidad de las partículas en dos movimientos es constante, esto se denomina escala de velocidades. Además, los patrones o trayectorias de dicho movimiento deben ser geoméricamente similares.

2.7.4 Similitud Dinámica

Establece que dos sistemas con fronteras geoméricamente iguales tengan patrones de flujo geoméricamente similares, en instantes de tiempo correspondientes. Esto requiere que todas las fuerzas individuales que actúan sobre elementos correspondientes de fluido tengan las mismas razones (proporciones) en los dos sistemas. Esta similitud se cumple cuando la relación de masas y fuerzas que afectan al movimiento de dos objetos son iguales.

2.8 Condiciones de Similitud

El diseño por similitud esencialmente consiste en un cambio de escala que permite trasladar información desde el modelo hacia el prototipo, de lo que se deriva las condiciones de similitud de un modelo.

Las escalas de longitudes, masas específicas, volúmenes específicos, viscosidades, velocidades, aceleraciones, tiempos, presiones, etc., no son independientes entre sí, sino que están relacionadas mediante las llamadas Condiciones de Similitud.

2.8.1 Similitud de Euler

Implica la proporcionalidad entre las fuerzas inerciales y de presión del modelo y del prototipo. Por lo que establece que el número de Euler del modelo debe ser igual al número de Euler del prototipo.

$$Eu_m = Eu_p$$

Eu_m : Número de Euler del modelo

Eu_p : Número de Euler del prototipo

Número de Euler

Es un número adimensional usado para analizar fluidos, donde la diferencia de presión entre dos puntos en una variable importante. Puede ser interpretado como una medida de la relación de fuerzas de presión con las fuerzas de inercia. Se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$Eu = \frac{P}{\rho V^2}$$

Donde:

P: Presión (Pa)

ρ : Densidad (kg/m³)

V: Velocidad del fluido (m/s)

2.8.2 Similitud de Reynolds

Implica la proporcionalidad entre las fuerzas inerciales y viscosas del modelo y del prototipo. Dos fluidos son dinámicamente semejantes si los números de Reynolds son iguales. Por lo tanto se debe cumplir:

$$Re_m = Re_p$$

Re_m : Número de Reynolds del modelo

Re_p : Número de Reynolds del prototipo

Número de Reynolds

Es un parámetro adimensional, que relaciona la fuerza de inercia (resistencia al cambio de movimiento) en un elemento de un fluido a la fuerza viscosa (peso) del elemento del fluido. Permite clasificar el régimen o clase de movimiento de flujo. Se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\vartheta} = \frac{QL}{\vartheta A}$$

El número de Reynolds para tuberías, se expresa como:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\vartheta} = \frac{QD}{\vartheta A}$$

Donde:

- V: velocidad principal del flujo (m/s)
- L: longitud del objeto por donde pasa el flujo (m)
- ρ : densidad del fluido (kg/m³)
- μ : viscosidad dinámica del fluido (Pa·s o N·s/m² o kg/m/s)
- ν : viscosidad cinemática ($\nu = \mu / \rho$) (m²/s)
- Q: flujo volumétrico (m³/s)
- A: área de la sección transversal de la tubería (m²)
- D: diámetro de la tubería por donde pasa el flujo (m).

El número de Reynolds se usa para determinar si el flujo es laminar, transicional o turbulento.

El flujo laminar se produce cuando las fuerzas viscosas son dominantes con relación a las fuerzas inerciales y es caracterizado por tener un movimiento constante de flujo. Mientras el flujo turbulento ocurre cuando las fuerzas de inercia son dominantes. El flujo transicional sucede cuando la transición de flujo con régimen laminar a turbulento es gradual.

Flujo Laminar $Re < 2300$

Flujo Transicional $2300 < Re < 4000$

Flujo Turbulento $Re > 4000$

Consecuentemente, un número grande de Reynolds indica una preponderancia marcada de las fuerzas de inercia sobre las fuerzas de viscosidad. Si éstas son despreciables, no rige la condición de Reynolds y no tiene influencia en las condiciones de escurrimiento.

2.8.3 Similitud de Froude

Implica la proporcionalidad entre las fuerzas inerciales y gravitatorias del modelo y del prototipo. Dos fluidos son dinámicamente semejantes si los números de Froude son iguales. Por lo tanto se debe cumplir:

$$Fr_m = Fr_p$$

Fr_m : Número de Froude del modelo

Fr_p : Número de Froude del prototipo

Número de Froude

Es un número adimensional que relaciona las fuerzas de inercias con las fuerzas gravitatorias que actúan en un fluido. Se expresa con la siguiente fórmula:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * D}}$$

ó

$$Fr^2 = \frac{V^2}{gD}$$

Donde:

V: velocidad del agua (m/s)

g: aceleración de la gravedad (m/s²)

D: profundidad hidráulica (m)

Cuando $Fr > 1$ el flujo es supercrítico y la fuerza de inercia es dominante. Como consecuencia la velocidad del canal es alta y la profundidad baja, el flujo se describe como rápido.

Cuando $Fr < 1$ el flujo se denomina subcrítico y las fuerzas gravitacionales son dominantes. El flujo tiene relativamente una velocidad baja y una alta profundidad y se lo describe como tranquilo o calmado. Es el flujo más común en canales naturales.

Cuando $Fr = 1$, el flujo es crítico. Ninguna de las fuerzas, ya sea de inercia o gravitacionales son dominantes. Solo un pequeño cambio en la velocidad o profundidad, hace que el flujo cambie a subcrítico y supercrítico. [1]

La condición del mundo real normalmente el flujo es subcrítico y por lo general el número de Froude es menor que 0.5.

2.9 Clasificación de modelos hidráulicos

Según el material de la frontera, cuando el fluido se encuentra en movimiento, los modelos pueden clasificarse como: modelos de fondo fijo y modelos de fondo móvil.

2.9.1 Modelo de fondo fijo

Son aquellos en los que al estar el fluido en movimiento no son capaces de alterar la frontera, ya que, dadas las características del material del fondo no le permiten su fácil erosión.

2.9.2 Modelo de fondo móvil

Al encontrarse el fluido en movimiento altera y modifica la frontera. Su estudio es destinado a procesos fluviales o marítimos en los que exista transporte de sedimentos y se desee conocer las erosiones que pueden producirse debido a la construcción de una obra de protección.

2.10 Escala en modelos hidráulicos

Un modelo físico es la representación a escala de una situación de flujo de descarga. Las escalas de las condiciones de borde, las condiciones de flujo aguas arriba y el campo de flujo deben ser seleccionadas de la manera adecuada. Este modelo ayudará a optimizar el diseño de la estructura, visualizando el campo de flujo antes de seleccionar el “mejor” diseño, y asegurar su operación. Aunque se debe tomar en cuenta que estos modelos serán usados para suplementar pero no para reemplazar el conocimiento teórico, experiencia y buen criterio del ingeniero.

El canal hidráulico que se estudia en la presente disertación es un canal rectangular. Se escogió esta forma por la facilidad constructiva y permite el estudio del comportamiento del agua con los diferentes vertederos.

Para la consideración de la escala del modelo hidráulico se debe tener en cuenta varios factores. Un modelo debe satisfacer las necesidades requeridas por la clase de proyecto que se desea construir a futuro. En nuestro caso, la escala del modelo se encuentra vinculada al lugar en donde se construyó el modelo hidráulico; al espacio disponible en el laboratorio y a los instrumentos utilizados para su funcionamiento. Es fundamental considerar el cumplimiento de las condiciones de similitudes.

Para modelos de canales abiertos la fuerza de gravedad será dominante en el fluido. Por lo que los efectos de escala se producen cuando otras distorsiones son introducidas, como la viscosidad. Para que esto no suceda se debe cumplir que los parámetros adimensionales entre el modelo y el prototipo sean iguales.

Todas estas consideraciones son importantes para que el modelo tenga una buena aceptación.

Tomando en cuenta todas estas condiciones para la escala de los modelos hidráulicos. En el estudio de nuestro modelo para la presente disertación, se optó por utilizar la escala 1:18. Por lo que para los cálculos, fórmulas, parámetros se debe realizar la conversión necesaria.

CAPÍTULO III

ESTUDIOS EN EL MODELO HIDRÁULICO

3.5 Estudio en un modelo

La investigación de un modelo es fundamental, por lo que es indispensable que vaya a la par con el estudio definitivo del diseño en tamaño real. Nos ayudará a disminuir márgenes y coeficientes de seguridad excesivos, además que tendremos un diseño con un grado satisfactorio de seguridad que sea lo más seguro y económico posible.

Según la experiencia se ha observado que varias de las estructuras que se construyeron luego de un estudio en modelo hidráulico funcionan razonablemente bien. Por esta razón realizar un estudio previo antes de construir una obra hidráulica es una excelente opción para tener buenos resultados futuros.

Se debe tomar en cuenta el control de la calidad del funcionamiento del modelo para su correcta utilización y obtener resultados confiables.

3.6 Vertederos de Pared Delgada

Los vertederos son estructuras localizadas a través de un canal abierto con una abertura especial en su cresta, los cuales regulan el flujo del agua y se utilizan para la medición del caudal.

Si la longitud de la cresta en la dirección del flujo del vertedero es igual o menor a 2 mm y la relación e/h (espesor de la pared del vertedero sobre altura del agua sobre el vertedero) es menor a 0,67 se denominan *vertederos de pared delgada*. Estos sirven para medir caudales con alta precisión.

$$\frac{e}{h} < 0,67 \text{ y } e < \frac{1}{2}h;$$

3.6.1 Aspectos Generales

Una de las principales funciones que cumplen los vertederos es lograr que el nivel en una obra de toma alcance el nivel requerido para el funcionamiento de la obra de conducción. Mantener un nivel casi constante aguas arriba de una obra de toma, para permitir que el flujo sobre el vertedero se desarrolle con una lámina líquida de espesor limitado. Cuando existen eventos de altas crecidas, el vertedero evacúa las aguas en exceso.

La placa de un vertedero de pared delgada debe ser lisa y plana, mientras que la superficie de la cresta debe tener superficies planas que forme una intersección de 90 grados con la cara del vertedero que se encuentra aguas arriba. El borde que se encuentra aguas abajo debe ser cortado si el ancho del vertedero es mayor a 2 mm y estas superficies deben formar un ángulo no menor a 45 grados en el caso de vertedero rectangular o trapezoidal y un ángulo no menor a 60 grados si se trata de vertedero triangular.

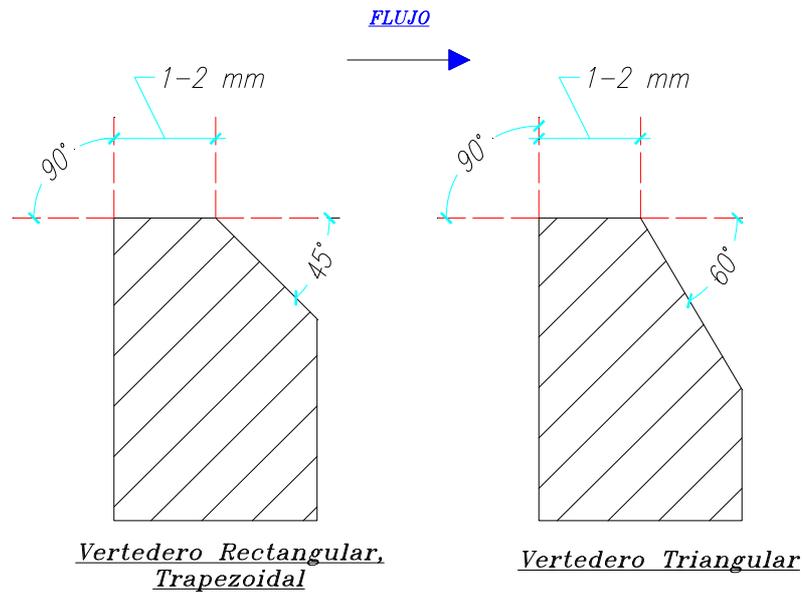


Figura 1. Flujo de agua sobre una cresta de un vertedero de pared delgada

Sharp Crested Weirs. Chapter 5

La exactitud de la medida del caudal demanda que el vertedero se encuentre ventilado, es decir que en ambas caras de la lámina actúe la misma presión atmosférica. Si no se encuentra ventilado crea succión y causa errores en la determinación de caudales.

Esta clase de vertederos de pared delgada son usados cuando se requiere calcular caudales de gran precisión en cualquier momento en una corriente pequeña. Por lo general se utilizan en laboratorios hidráulicos, canales pequeños, industrias y corrientes que no lleven escombros o sedimentos.

Definiciones

La cresta del vertedero es la pared horizontal de la escotadura en contacto con el agua del canal, se representa como L . La diferencia de nivel entre la cresta y la superficie del agua antes del abatimiento se denomina altura de carga del vertedero h , esta medida debe ser tomada a una distancia d de la cresta (5 a 10 h). La carga sobre la cresta se denomina al espesor del chorro medido sobre la cresta. El abatimiento o depresión tiene un valor del 31% de la carga del vertedero. La napa, lámina vertiente o vena es el chorro descargado a través de la escotadura del vertedero. [2]

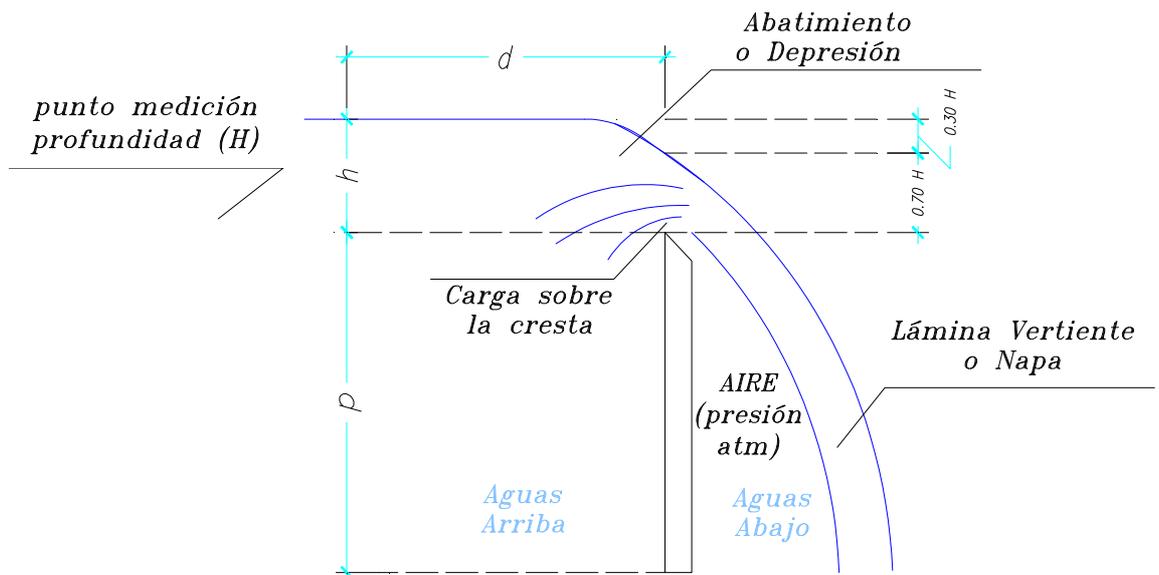


Figura 2. Definiciones de un vertedero

Elaborado por: Stephanie Almeida

Se estudian varios tipos de vertederos de pared delgada, dependiendo de la abertura por la que fluye el líquido, como los que se mencionan a continuación:

- Vertedero Rectangular
- Vertedero Triangular
- Vertedero Cipolletti o Trapezoidal

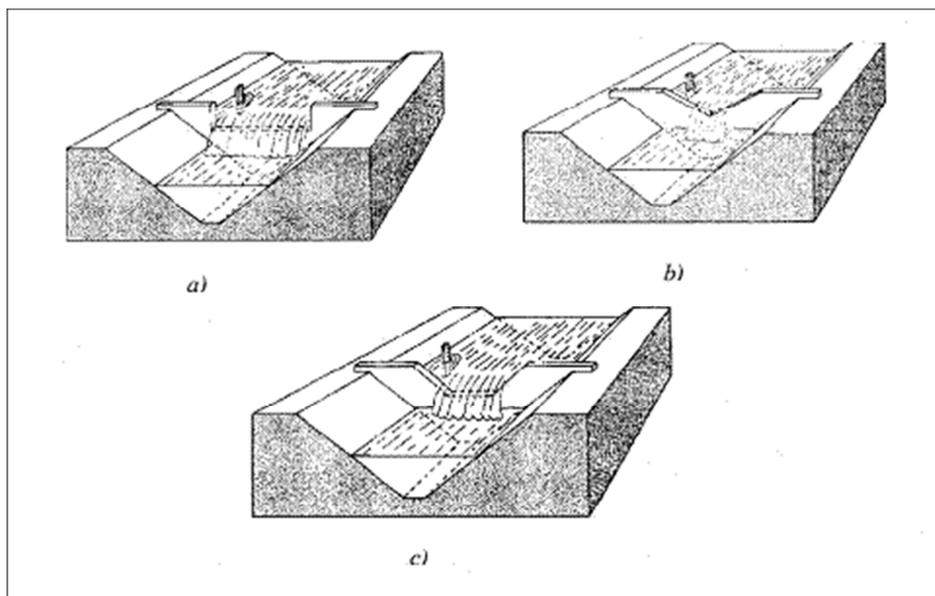


Figura 3. Vertederos. a) Rectangular; b) Triangular; c) Trapezoidal

Linsley, Ray y Franzini, Joseph. Ingeniería de los Recursos Hidráulicos.

3.6.2 Teorema de Torricelli

Es una aplicación del principio de Bernoulli que consiste en la relación del caudal y la altura de carga. A partir de este teorema se puede calcular el caudal de salida de un líquido por un orificio.

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

$$Q = A * V$$

$$Q = A\sqrt{2gH}$$

La fórmula del caudal también puede ser expresada como la descarga de un vertedero de cresta libre, dada por la siguiente ecuación:

$$Q = C_w L h^{3/2}$$

Donde:

Q: Descarga (m³/s)

C_w: Coeficiente de descarga, adquiere el valor de 1,86

L: Longitud de la cresta (m)

h: Es la carga sobre el vertedero, distancia vertical desde la cresta del vertedero a la altura del agua (m)

3.6.3 Flujo Libre

Si la superficie del flujo aguas abajo del vertedero es más baja que la cresta se dice que el flujo sobre el vertedero es libre. Para obtener esta precisión es necesario que la lámina vertiente descargue completamente libre, con lo que se debe asegurar que la presión sea la atmosférica. [3]

Se considera que la descarga del chorro de agua a través de un vertedero se encuentra correcta, cuando este chorro está suficientemente separado de las paredes del

vertedero. Para conseguir esto se debe variar el caudal hasta que se alcance las condiciones deseadas.

3.7 Descripción del canal y Características del flujo

El canal que se construyó para el uso de vertederos y a su vez realizar el cálculo del caudal debe tener ciertas características específicas, como las que se mencionan a continuación:

- ✓ Para que no exista resalto hidráulico, la pendiente del canal debe ser moderada; en nuestro caso estamos trabajando con pendiente cero para evitar cualquier problema.
- ✓ No debe presentar permeabilidad, para ello se construyó con material de acrílico, el cual es impermeable.
- ✓ El ancho del canal de acceso debe ser equivalente a ocho veces el ancho del vertedero y debe extenderse aguas arriba quince veces la profundidad de la corriente sobre el vertedero.
- ✓ Debe existir suficiente borde libre para que no se presente desbordamiento del flujo aguas arriba, esto es fundamental para tener precisión en la medición de las medidas para el cálculo del caudal.
- ✓ El tramo del canal debe ser largo y con una sección regular, para garantizar la exactitud en las mediciones, la longitud aguas arriba, es decir desde el sitio de aforo, debe ser diez veces el ancho del canal.
- ✓ El flujo debe ser laminar, es decir tiene un movimiento constante, permanente y uniforme; además debe tener un régimen subcrítico.

- ✓ No se debe presentar perturbaciones como remolinos, resaltos hidráulicos, obstrucciones, entre otros.
- ✓ Para evitar cualquier tipo de estos inconvenientes o cualquier clase de turbulencia, se recomienda que la velocidad del flujo sea menor a 0.15 m/s, así se logra una superficie de agua tranquila para la medición exacta de la altura de carga.
- ✓ Se debe cumplir la ley de presiones hidrostáticas.
- ✓ Un vertedero debe tener la cresta en forma de arista, para que el contacto del fluido con el vertedero sea en arista, esto reduce el efecto de la viscosidad y la tensión superficial. También permite que para cargas de fluido bajas sobre la cresta la lámina de agua no se adhiera tan fácilmente.
- ✓ Las crestas deben colocarse con suficiente altura para que entre aire por debajo y para asegurar la caída libre del chorro.
- ✓ El mantenimiento y revisión es tan importante como la instalación. La cresta debe mantenerse al nivel y con el cero de la regla a la misma elevación de la cresta.
- ✓ El canal tiene que estar siempre libre de basura y vegetación ya que puede reducir el área y aumentar la velocidad en ella. Por lo que es recomendable limpiar los sedimentos que pueden acumularse en el área de embalse aguas arriba. [4]

3.7.1 Mediciones en el Canal Hidráulico

Se debe seguir un procedimiento riguroso para la toma de datos y así obtener resultados confiables para el análisis del experimento.

A continuación se detalla el procedimiento de la toma de datos para los vertederos de pared delgada.

Altura de la cresta y ancho del espejo de agua

Estas mediciones se las obtiene directamente con la ayuda de una cinta métrica o un aparato de alta calibración. Es importante determinar con alta precisión la altura de la cresta del vertedero p y el ancho del espejo de agua B para el éxito del experimento.

La medida de la altura de la cresta del vertedero se la toma aguas arriba de la estructura y se la realiza desde el fondo del canal.

Seguidamente se toma la medida del ancho del espejo del agua, es decir el ancho del canal visto en planta, aguas arriba del vertedero. Ya que el canal no puede ser completamente uniforme, es recomendable tomar varias medidas para sacar un promedio, la variación será de menos de un centímetro, pero se debe verificar la medida exacta.

Altura de carga

La altura de carga h es el nivel de agua sobre el vertedero. La importancia de la medida de carga es tal, que el éxito o el fracaso de una obra de medición dependen enteramente de la eficacia del limnómetro que se utilice para medir. Este instrumento de medición debe colocarse aguas arriba del vertedero, para que caiga fuera de la zona de descenso de la superficie del agua y cerca del mismo para que entre ambos la pérdida de energía sea despreciable, por lo que se recomienda que deba ser medida a una distancia entre 3 a 4 veces la carga máxima esperada. Debe medirse a una distancia suficiente aguas arriba del vertedero para evitar efectos de la curvatura de la superficie del agua cerca del mismo.

En condiciones de campo no siempre se dispone de un limnómetro por lo que también se puede utilizar un perfil metálico o de madera, el cual sirve de referencia, y con la ayuda de un flexómetro o una cinta métrica se procede con la medición. Cabe recalcar, que para esto el vertedero debe estar nivelado y en posición vertical. Si es necesario se debe utilizar un nivel para confirmar su correcta posición. Una vez instalado este perfil se toma la altura desde el instrumento de medición hasta la cresta del vertedero, esta medición se la llama H_c , que es un valor constante.

Consecutivamente, se mide la altura desde el perfil hasta la superficie del agua H_s , como ya se mencionó previamente esta medida debe ser realizada a una distancia de tres a cuatro veces la altura de carga máxima esperada. Para ellos en el canal se encuentra previamente señalada esta distancia establecida.

Todas estas mediciones deben ser tomadas con todas las precauciones necesarias para que sean las más exactas posibles, y así al final tener un porcentaje de error bajo.

Con todos estos datos, utilizamos la siguiente fórmula:

$$h = H_c - H_s$$

Donde:

h : altura de carga (desnivel entre superficie libre aguas arriba y cresta)

H_c : altura desde el limnómetro hasta la cresta del vertedero

H_s : altura desde el limnómetro hasta la superficie del agua

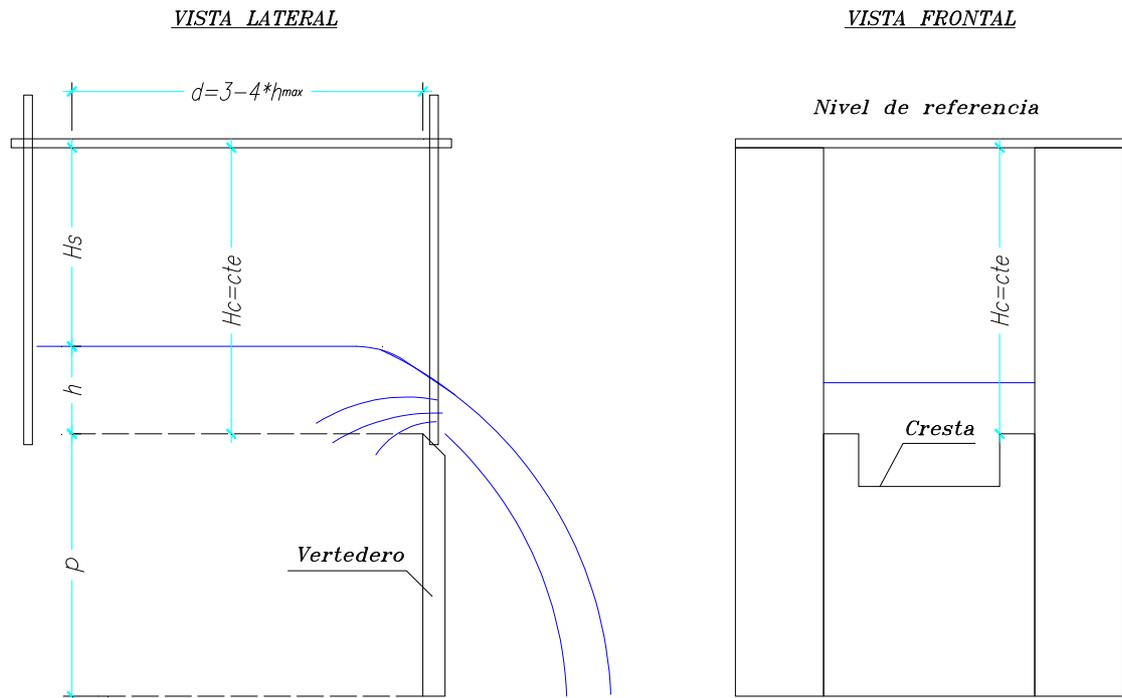


Figura 4. Medición altura de carga del vertedero h .

Elaborado por: Stephanie Almeida

3.7.1.1 Consideraciones importantes en los vertederos

Coefficiente de descarga

Al calcular el caudal con este tipo de vertederos no se puede obtener el caudal real, ya que no contempla las pérdidas de energía existentes, pérdidas por fricción en el tramo, efectos de tensión superficial, por lo que el caudal real es menor que el teórico. Por tanto es necesario corregirlo con el coeficiente de descarga C_d , que es la relación entre el caudal real y el teórico. Sirve como factor de corrección del caudal medio para tomar en cuenta las pérdidas de energía presentes durante el experimento. [5]

Si las estructuras presentan un coeficiente de descarga alto, quiere decir que la pérdida de carga es pequeña. El vertedero rectangular tiene coeficientes de descarga más altos que el vertedero triangular, es decir si tenemos un mismo caudal en los dos casos, el vertedero rectangular producirá menor remanso aguas arriba.

Sensibilidad

Es la variación de la descarga a causa de los cambios en el nivel del agua o por errores en la medición de la altura de carga. Se expresa como:

$$S = u \frac{\Delta h}{h}$$

Donde:

S: Sensibilidad

u: Coeficiente de forma del vertedero

Δh : Variación en el nivel de agua

h: altura de carga

La sensibilidad aumenta cuando incrementa los valores de u y disminuyen los valores h , Los vertederos triangulares son más sensibles a un caudal reducido, pero su ancho aumenta para ajustarse a caudales mayores. Por lo general, el ángulo de corte es de 90 grados, pero si es necesario aumentar la sensibilidad se pueden emplear vertederos de ángulos de 60, 30 y 15. Por estas consideraciones es necesario tomar mayor precaución en la toma de datos de este tipo de vertederos. [6]

3.7.2 Lámina vertiente

La vena líquida que fluye a través del vertedero se llama capa o lámina vertiente. Esta puede presentarse en diversas formas.

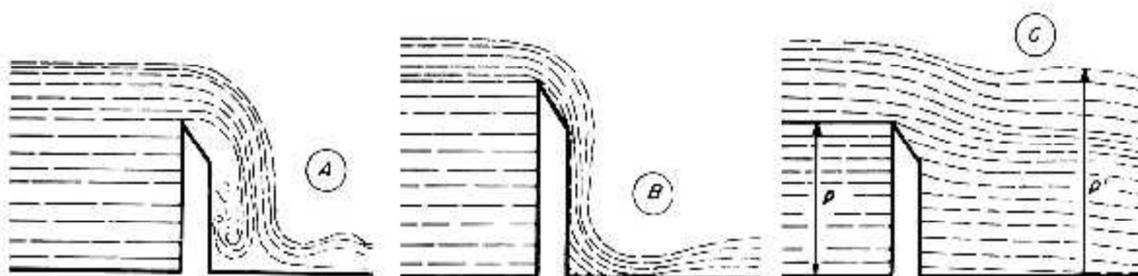
Lámina libre: cuando el aire atmosférico rodea completamente a la lámina y ésta se despega totalmente de la cara aguas abajo; esta forma corresponde al régimen más estable y es el que se debe cumplir en el laboratorio. Se obtiene mediante una ventilación adecuada.

Es importante que al colocar cualquier clase de vertedero, en el canal hidráulico, se obtenga una lámina libre para poder tomar las medidas respectivas correctamente y así, consecuentemente obtener resultados coherentes. Para ello es indispensable conocer la potencia de la bomba y acorde a esta característica se debe regular el flujo de agua para tener las condiciones necesarias en el laboratorio.

En los vertederos en que el aire no penetra normalmente en el espacio debajo de la lámina vertiente, puede ocurrir una depresión modificándose la posición de la vena y alterándose el caudal.

La lámina líquida puede tomar las siguientes formas que deben evitarse:

- ✓ *Lamina deprimida*: El aire es arrastrado por el agua, ocurriendo un vacío parcial aguas debajo de la estructura, que modifica la posición de la vena, el caudal es mayor al previsto teóricamente.
- ✓ *Lamina adherente*: Ocurre cuando el aire sale totalmente. En este caso el caudal también es superior al previsto o dado por las formulas indicadas. Este régimen se presenta para pequeñas cargas, en cuyo caso la velocidad es insuficiente para despegar a la lámina del agua.
- ✓ *Lamina ahogada*: Cuando el nivel aguas abajo es superior al de la cresta, el caudal disminuye a medida que aumenta la sumersión.



a) Deprimida

b) Adherida

c) Ahogada

Figura 5. Forma de Vena Líquida

Schlag, Albert. Hidráulica.

3.8 Orificios de pared delgada

3.8.1 Características

Orificio es una abertura en forma regular, generalmente redondo, en una pared o en el fondo de un recipiente, a través del cual distribuye líquido contenido. A la corriente líquida que sale del recipiente se la llama vena líquida o chorro.

Se denomina orificio de pared delgada, si el único contacto entre el líquido y la pared es alrededor de una arista afilada. Se debe cumplir la siguiente condición:

$$e < \frac{1}{2} a$$

Donde:

e: espesor de la pared del vertedero.

a: tamaño de la abertura del orificio por donde sale el líquido, diámetro.

La altura de líquido que origina la salida del caudal de la estructura, medida desde el nivel del líquido hasta el baricentro del orificio se denomina carga, H .

Según el nivel del líquido, los orificios se clasifican en:

Orificio con descarga libre: Cuando el chorro fluye libremente siguiendo una trayectoria parabólica. El nivel del líquido en el canal aguas abajo, está por debajo del borde inferior del orificio.

Orificio sumergido: El nivel del líquido en el canal de salida está por arriba del borde superior del orificio. Estas condiciones dependen del caudal y diseño del canal.

El caudal que pasa a través de un orificio de cualquier tipo, está dado por la siguiente ecuación general de patronamiento:

$$Q = KH^m$$

Q: Descarga (m³/s)

K: Constante característica del orificio.

H: Carga hidráulica medida desde la superficie hasta el centro del orificio.

m : Exponente

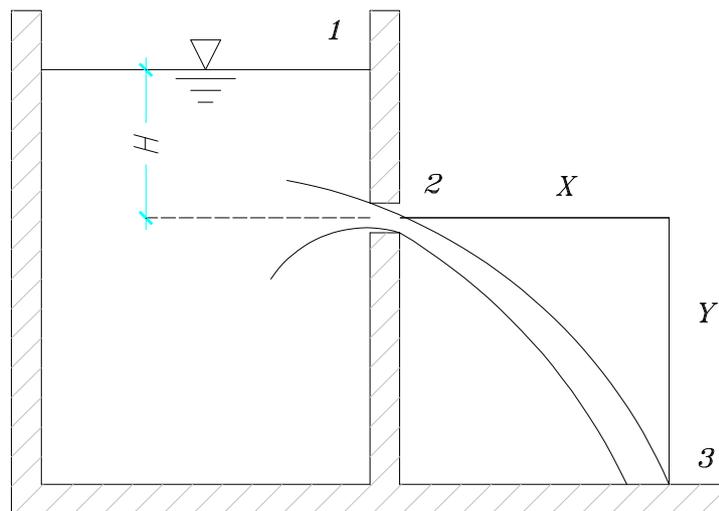


Figura 6. Orificio en Pared Delgada.

Elaborado por: Stephanie Almeida

Si aplicamos la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2, se tiene:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Para el caso de un vertedero libre la velocidad y presión relativa en el punto 1 son nulas ($V_1 = 0$, $P_1 = 0$) además el chorro en el punto 2 se encuentra en contacto con la atmósfera por lo que se desprecian las pérdidas. Con estas consideraciones, se obtiene la fórmula de la velocidad:

$$H_1 = 0 + \frac{V_2^2}{2g}$$

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

3.8.2 Igualdad en el alcance de dos chorros ubicados a diferentes alturas

En la teoría de la Hidrodinámica se establece la caída de agua de dos chorros que pasan a través de un orificio, ubicados a diferentes alturas, llegan al mismo punto. Este fenómeno es posible cuando la altura de carga h_1 es igual a la altura de carga H_2 .

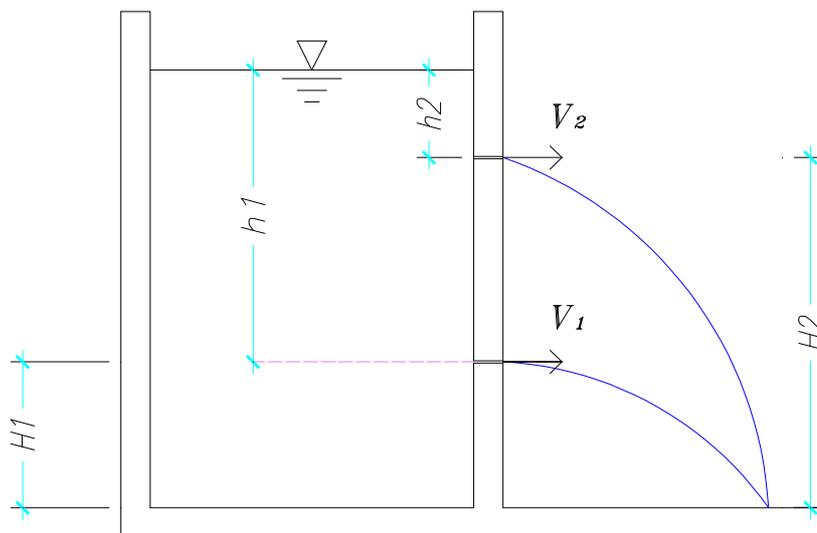


Figura 7. Alcance de dos chorros. Estudio y patronamiento de orificios.

Elaborado por: Stephanie Almeida.

Donde:

Chorro 1:

h_1 : Altura de carga

H_1 : Altura de caída

V_1 : Velocidad de salida

Chorro 2:

h_2 : Altura de carga

H_2 : Altura de caída

V_2 : Velocidad de salida

Demostración:

Ecuaciones de condición

$$h_1 = H_2 \quad (1)$$

$$H_1 = h_2 \quad (2)$$

Ecuaciones del movimiento:

Movimiento Vertical

$$V = \sqrt{2gh} \quad (3)$$

Movimiento Horizontal

$$H = V_0t + \frac{1}{2}gt^2$$

No hay velocidad inicial, por lo que se anula.

$$H = \frac{1}{2}gt^2$$

Despejando el tiempo, se obtiene:

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$$

(4)

Desplazamiento

$$x = V \times t \quad (5)$$

Se reemplaza las ecuaciones (3) y (4) en (5) para los chorros 1 y 2.

$$x_1 = \sqrt{2gh_1} \times \sqrt{\frac{2H_1}{g}}$$

$$x_2 = \sqrt{2gh_2} \times \sqrt{\frac{2H_2}{g}}$$

Simplificando, se tiene:

$$x_1 = 2\sqrt{h_1H_1} \quad (6)$$

$$x_2 = 2\sqrt{h_2H_2} \quad (7)$$

Se reemplaza las ecuaciones (1) y (2) en (6)

$$x_1 = 2\sqrt{H_2h_2}$$

Por tanto, se comprueba que:

$$x_1 = x_2$$

CAPÍTULO IV

PROCEDIMIENTO DE TOMA DE DATOS

4.5 Desarrollo Hidráulico del Vertedero Triangular de Pared Delgada

4.5.1 Características

Los vertederos triangulares de pared delgada se caracterizan porque la forma de la cresta por donde pasa el flujo es triangular. Son muy precisos para la medición de caudales, sencillos de instalar de manera temporal o permanente. La forma en V significa que son más sensibles a un caudal reducido, pero su ancho aumenta para ajustarse a caudales mayores. El ángulo de la escotadura es casi siempre de 90° , pero se dispone de diagramas de calibración para otros ángulos, 60° , 30° y 15° , cuando es necesario aumentar la sensibilidad.

El vertedero triangular es también conocido como vertedero Thomson, es preferido cuando las descargas son pequeñas, porque la sección transversal de la lámina vertiente muestra de manera notoria la variación en altura.

Comprenden de dos tipos según las características de sus descargas:

- ✓ *Vertedero con contracción completa*
- ✓ *Vertedero con contracción parcial*

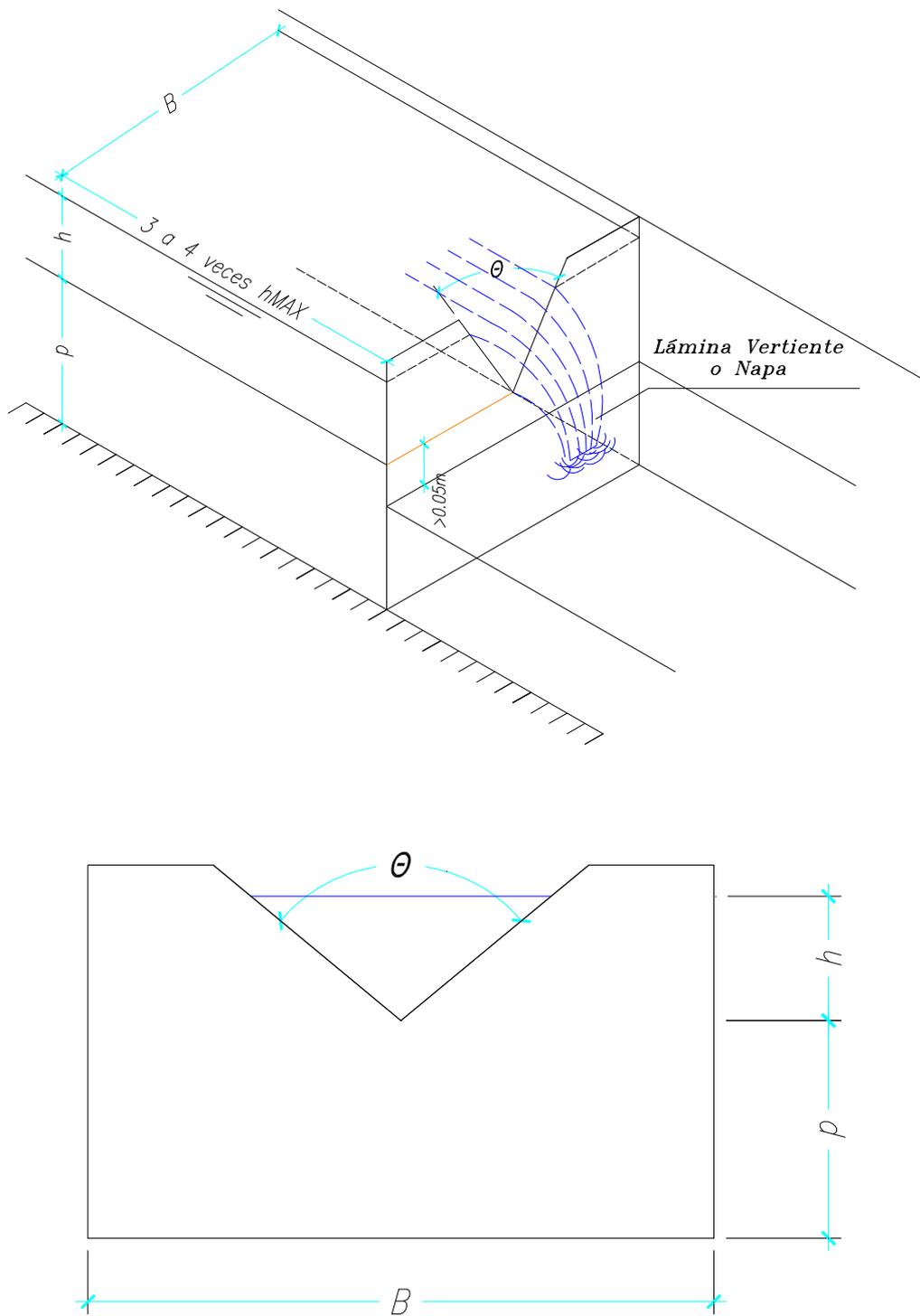


Figura 8. Vertedero Triangular de Pared Delgada

Elaborado por: Stephanie Almeida

Vertedero con contracción completa: Cuando las paredes y fondo del canal de aproximación se hallan lo suficientemente alejadas de la ventana del vertedero, se produce una contracción completa del flujo al atravesar la misma.

Vertedero con contracción parcial: Se presenta cuando no existe contracción completa debido a su proximidad con las paredes o fondo del canal de aproximación.

[7]

4.5.2 Evaluación de la descarga

La ecuación para el cálculo del caudal para vertederos triangulares de pared delgada, es la siguiente:

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h_d^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

Q: descarga, caudal o gasto (m³/s ó l/s)

g: aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

C_d: Coeficiente efectivo de descarga, depende de los parámetros h/p, h/B, θ

θ: ángulo de escotadura del vertedero

h_d: altura de carga efectiva (m). Este dato se calcula sumando, $h_d = h + K_h$

K_h: representa los efectos combinados de las propiedades del fluido. Valores empíricos, como función del ángulo, coeficiente de ajuste de la altura de carga,

se pueden obtener del *Gráfico 1*. $h_d = h + K_h$

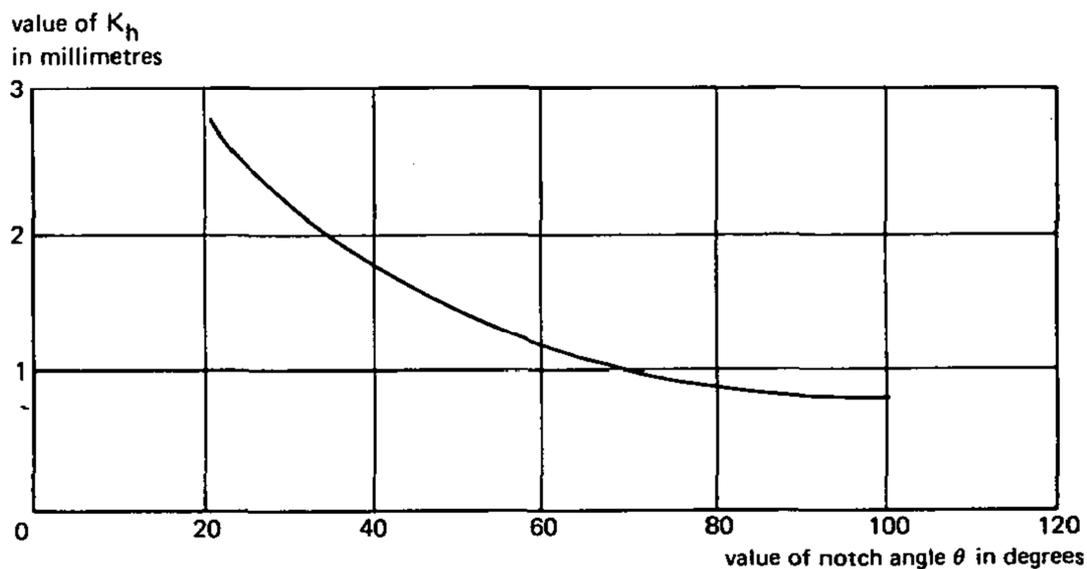


Gráfico 1. Value of K_h as a function of the notch angle.

Sharp Crested Weirs.

La tolerancia de K_h , se espera que se encuentra en el orden de 0.0003 m.

La ecuación de la descarga fue propuesta por Kindsvater y Carter en el año 1957, puede ser utilizada tanto como para contracción completa y contracción parcial.

Condiciones para la aplicación de la ecuación:

- La relación h/p debe ser igual o menor que 1.2
- La relación h/B debe ser igual o menor que 0.4
- La altura de la carga sobre el vertedero h no debe ser menor que 0.049 m, ni mayor que 0.61 m.
- La altura de la cresta del vertedero p no debe ser menor que 0.10 m

- El ángulo del vertedero puede variar entre 25 y 100 grados. El nivel de agua abajo debe permanecer más abajo que el vértice de la escotadura.

4.5.2.1 Vertedero Triangular con contracción completa

Para el cálculo del caudal y la precisión en los resultados, es recomendable que se cumpla con las siguientes relaciones:

$$h/p \leq 0.4$$

$$h/B \leq 0.2$$

$$p \geq 2.5 \text{ cm}$$

$$B \geq 5.0 \text{ cm}$$

$$0.28 \text{ cm} < h \leq 2.11 \text{ cm}$$

$$25^\circ < \theta \leq 100^\circ$$

Para vertederos de contracción completa con un ángulo entre 25 y 100 grados, el coeficiente de descarga se encuentra en el rango de 0,57 a 0,59.

El valor de C_d depende únicamente del valor del ángulo de la escotadura Θ . Por lo que se utiliza el *Gráfico 2* para estimar dicho valor. Se espera que el porcentaje de error sea del 1%.

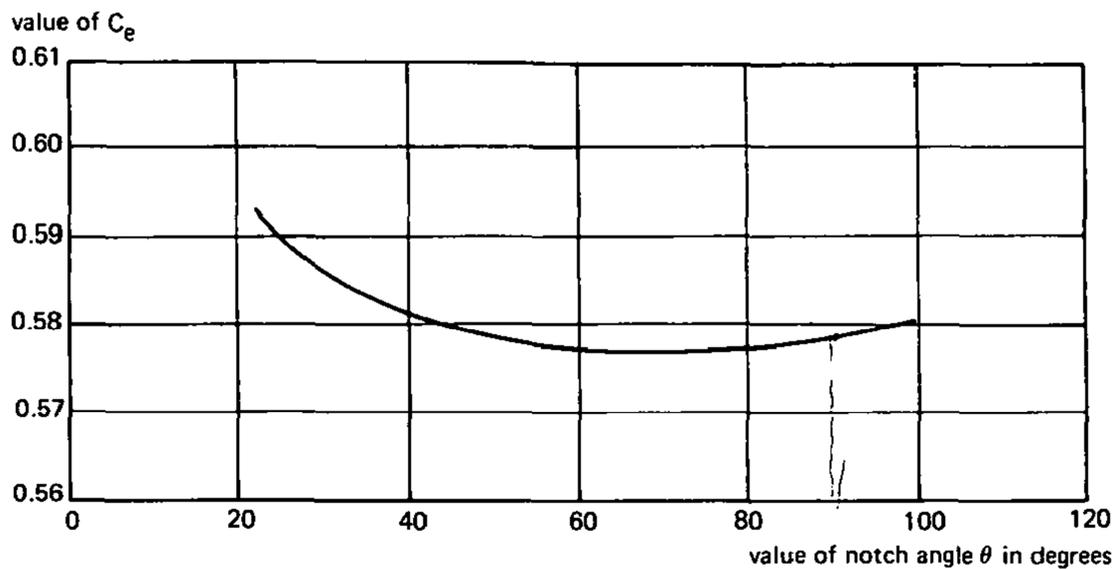


Gráfico 2. Coefficient of discharge C_d as a function of notch angle for fully contracted V-notch weirs.

Sharp Crested Weirs.

4.5.2.2 Vertedero Triangular con contracción parcial

Es recomendable que se cumpla con las siguientes relaciones:

$$h/p \leq 1.2$$

$$h/B \leq 0.4$$

$$p \geq 0.56 \text{ cm}$$

$$B \geq 3.33 \text{ cm}$$

$$0.28 \text{ cm} < h \leq 3.33 \text{ cm}$$

$$\theta = 90^\circ$$

Se utiliza el *Gráfico 3* para estimar el valor del coeficiente de descarga para vertederos triangulares con contracción parcial. El porcentaje de error varía del 1% al 2%, tomando en cuenta que el vertedero debe ser construido e instalado con precaución.

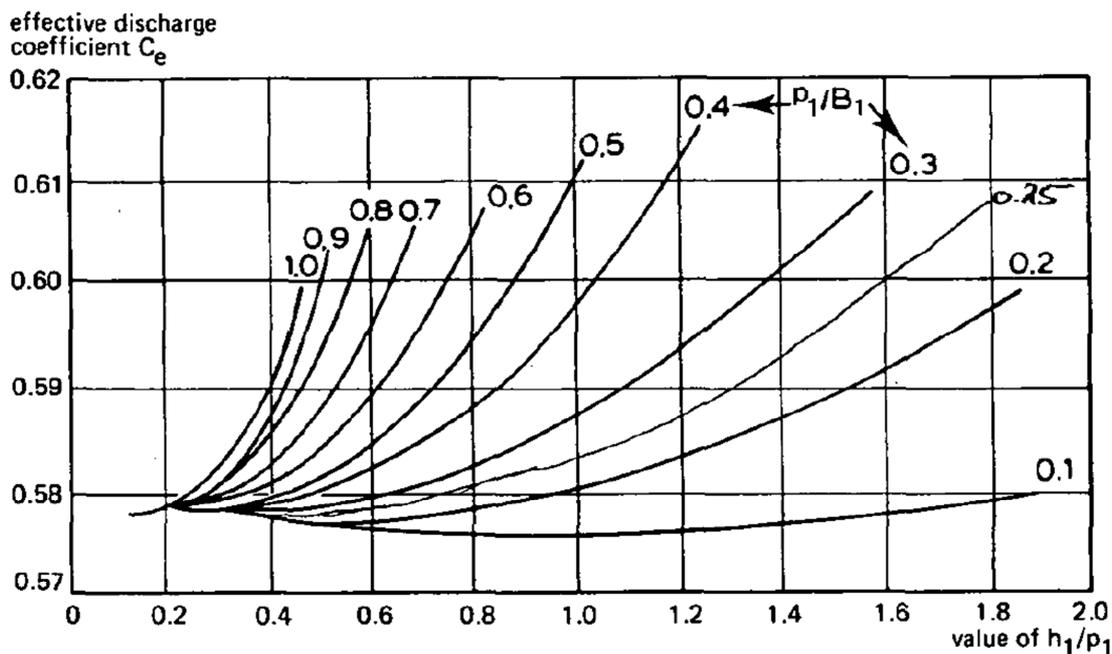


Gráfico 3. Coefficient of discharge C_d as a function of h_1/p_1 and p_1/B_1 , for 90-degree V-notch sharp-crested weir.

(From British Standard 3680: Part 4A and ISO/TC 113/GT 2 (France-IO) 1971)

4.6 Desarrollo Hidráulico del Vertedero Rectangular de Pared Delgada

4.6.1 Características

Los vertederos rectangulares de pared hidráulica son el tipo más antiguo de vertederos en uso. Su simple construcción los hace populares.

Los vertederos rectangulares se pueden clasificar en vertederos sin contracción lateral y con contracción lateral; el primero es cuando el ancho del vertedero es igual al ancho del canal y en el otro sucede lo contrario. Esta observación se puede apreciar en el siguiente gráfico:

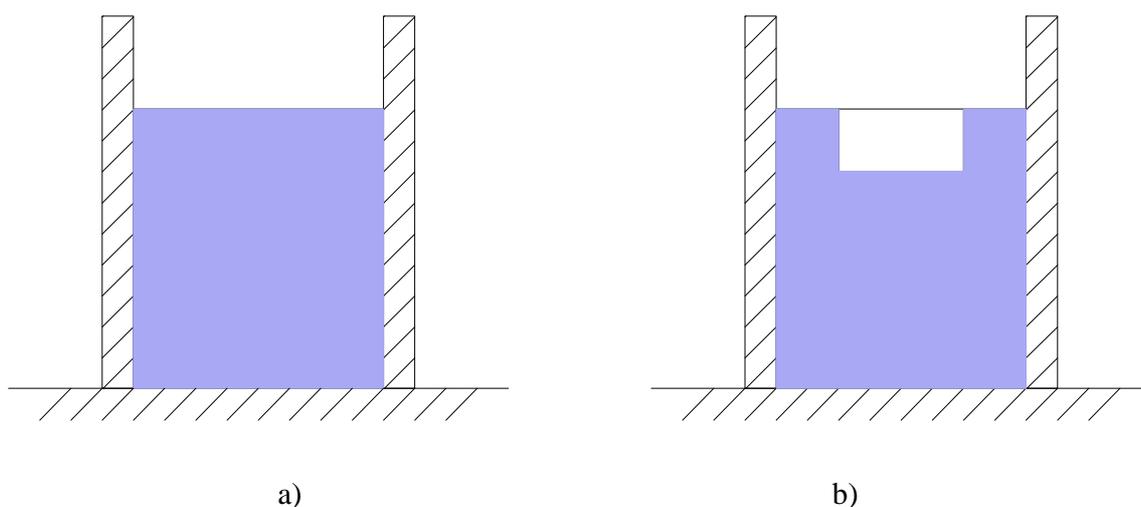


Figura 9. Vertedero a) sin contracción lateral b) con contracción lateral

Práctica de Mecánica de Fluidos.

Completamente Contraídas: Para que el vertedero sea contraído, $B - b$, debe ser mayor que cuatro veces la altura de carga máxima esperada y debe cumplir con la condición que $b < B$. Son los vertederos más utilizados, ya que puede ser empleado independientemente de la forma del canal, tomando en cuenta que la velocidad del flujo debe ser despreciable.

Suprimidas: Quiere decir que no tiene ninguna clase de contracciones. Es decir que el ancho del vertedero b no es igual al ancho del canal B .

Parcialmente Contraídas: El vertedero es parcialmente contraído cuando $B - b$ se encuentra entre 0 y cuatro veces la altura de carga máxima esperada ($4h_{MAX}$). [8]

Para un adecuado funcionamiento para vertederos rectangulares de pared delgada con contracción completa, se debe cumplir con los siguientes parámetros:

$$B - b \geq 4h$$

$$0.5 \leq h/p \leq 2$$

$$h/b \leq 0.5$$

$$b \geq 0.30 \text{ cm}$$

$$p \geq 0.30 \text{ cm}$$

$$0.20 \text{ cm} < h \leq 3.33 \text{ cm}$$

Ventajas Vertedero Rectangular

- ✓ Presenta mayores coeficientes de descarga.
- ✓ Ocasiona menor remanso (menor bordo libre requerido).
- ✓ Permite la medición de caudales mayores, debido a que el ancho se puede elegir para que pase el caudal previsto a una profundidad adecuada
- ✓ Presenta mayor capacidad de transporte de material flotante.
- ✓ Tiene menor sensibilidad y en consecuencia menor error probable en la medición del caudal en condiciones de campo.
- ✓ Facilidad en la construcción e instalación.

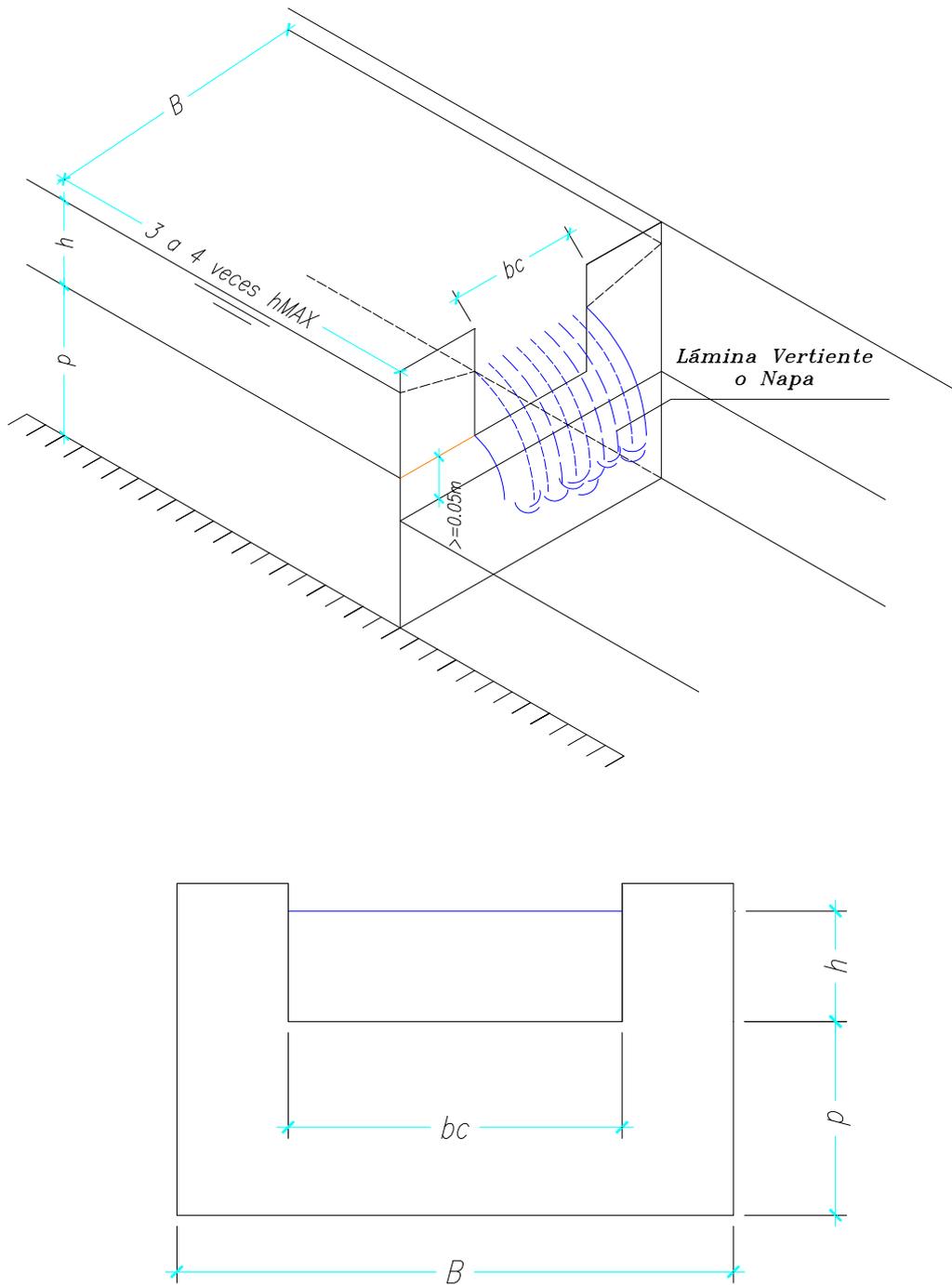


Figura 10. Vertedero Rectangular de Pared Delgada

Elaborado por: Stephanie Almeida

4.6.2 Evaluación de la descarga

Aplicando la ecuación de energía, se obtiene una expresión para el caudal para vertederos rectangulares de pared delgada:

$$Q = \frac{2}{3} C_d b_e \sqrt{2g} \left(h_d + \frac{V^2}{2g} \right)^{3/2}$$

Despreciando la influencia de la velocidad de llegada al vertedero y para poder aplicar para vertederos suprimidos, parcialmente contraídos y completamente contraídos, la ecuación se simplifica, quedando de la siguiente forma:

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} b_e \times h_d^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

V: Velocidad de llegada al vertedero (m/s). (Se elimina en la segunda ecuación).

Q: descarga, caudal o gasto (m³/s ó l/s)

g: aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

C_d : coeficiente efectivo de descarga, cuyos valores están entre 0.55 y 0.65

b_e : ancho de la cresta del vertedero (m)

$$b_e = b_c + K_b$$

h_d : altura de carga hidráulica sobre la cresta (m)

$$h_d = h + K_h$$

Los valores de K_b y K_h , representan los efectos combinados de varios fenómenos atribuidos a la viscosidad y tensión superficial. El valor de K_b se calcula mediante el Gráfico 5 y el valor de K_h , se lo considera como valor preestablecido 0,001 m.

Para el cálculo del coeficiente de descarga, se utiliza el Gráfico 4 ó la Tabla 1.

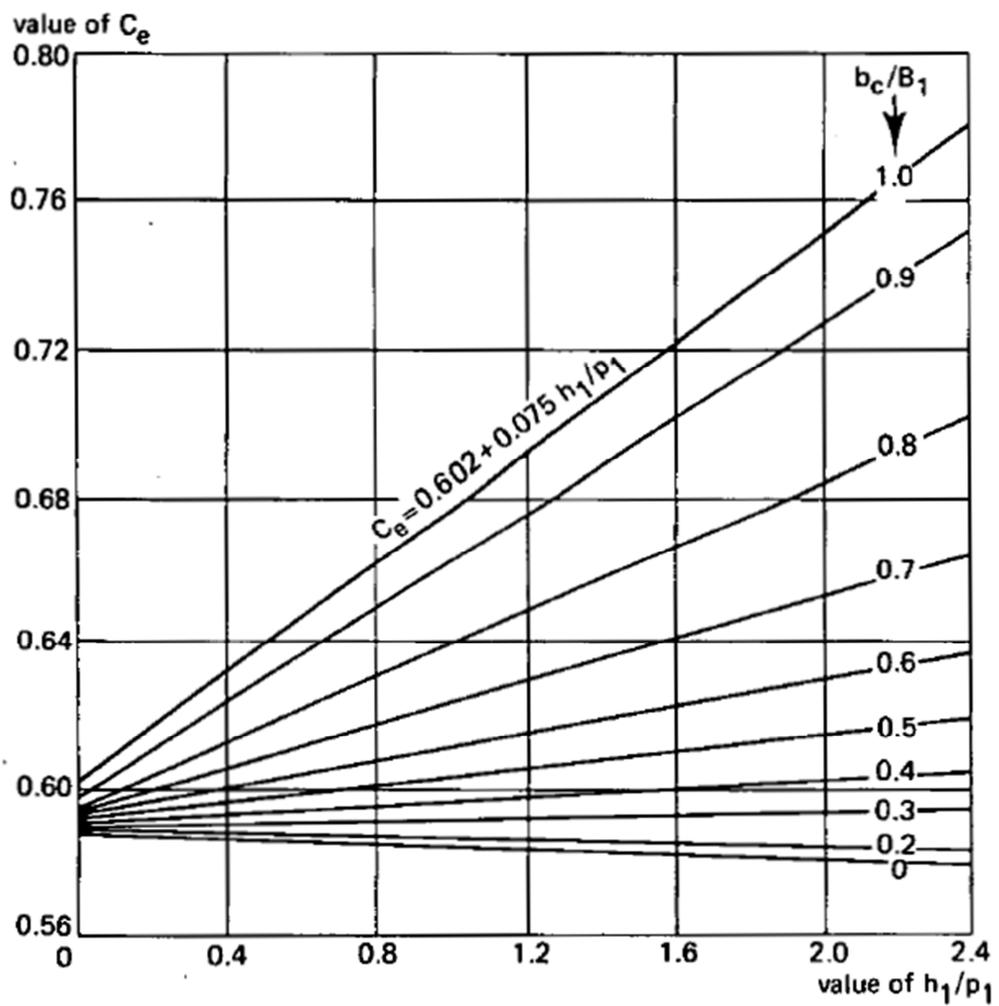


Gráfico 4. Coefficient of discharge C_d as a function of the ratios b/B , and h/p

(Georgia Institute of Technology, 1989)

Coeficientes efectivos de descarga

b/B	Cd	
1,0	0,602 +	0,075 h/p
0,9	0,599 +	0,064 h/p
0,8	0,597 +	0,045 h/p
0,7	0,595 +	0,030 h/p
0,6	0,593 +	0,018 h/p
0,5	0,592 +	0,011 h/p
0,4	0,591 +	0,0058 h/p
0,3	0,590 +	0,0020 h/p
0,2	0,589 -	0,0018 h/p
0,1	0,588 -	0,0021 h/p
0,0	0,587 -	0,0023 h/p

Tabla 1. Coefficient of discharge Cd as a function of b/B y h/p

(Georgia Institute of Technology, 1989)

Para el cálculo de K_b , se considera el siguiente gráfico:

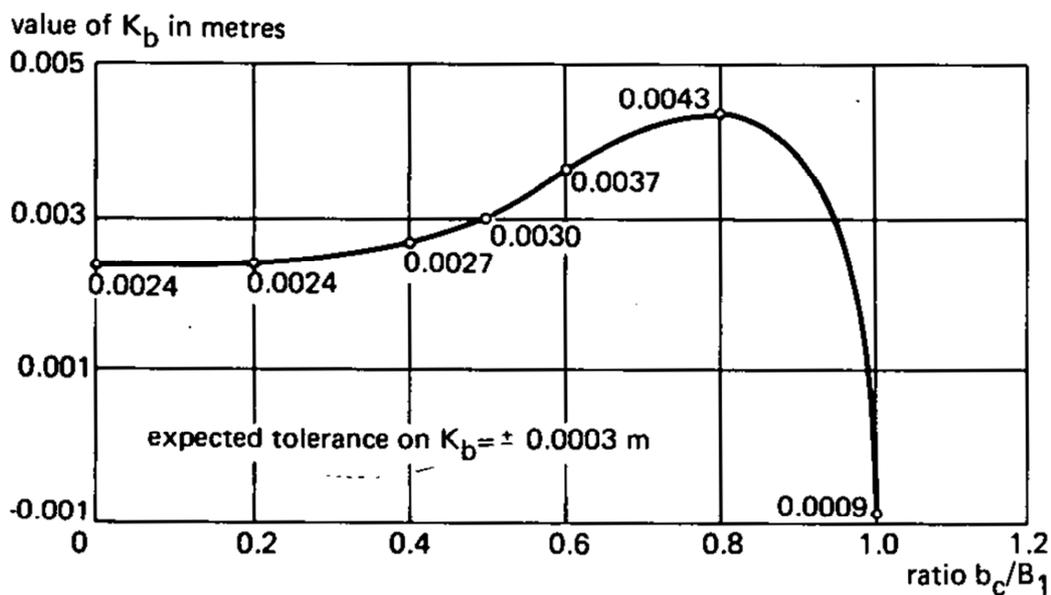


Gráfico 5. Values of K_b as a function of b/B (derived from tests at the Georgia Institute of Technology by Kindsvater and Carter 1957)

Vertederos de pared delgada sin contracciones: para esta situación la longitud efectiva del vertedero es L' . El efecto de la contracción se tiene en cuenta restando a la longitud total de la cresta del vertedero L , el número de contracciones multiplicada por $0.1h$.

$$L' = L - n(0.1h)$$

Donde:

L' : longitud contraída de la lámina de agua en el vertedero

L : longitud real del vertedero

n : número de contracciones laterales (Figura 5)

Reemplazando, se obtiene:

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} (L - 0.1nh) h^{3/2}$$

Se conoce que los vertederos rectangulares son los más utilizados por las ventajas que presentan en su fácil instalación, construcción, amplio rango de cálculo de caudales. Pero es necesario conocer que en la práctica, no es común tener vertederos rectangulares sin contracciones, por lo que la fórmula anterior no es muy utilizada. Para el desarrollo de este laboratorio se utilizará la fórmula de la descarga de Kindsvater and Carter, previamente estudiada para vertederos rectangulares de pared delgada. [9]

4.7 Vertedero Trapezoidal o Cipolletti

4.7.1 Características

El Ingeniero Cipoletti propuso un vertedero para eliminar la corrección y longitud efectiva de la cresta. Este vertedero trapezoidal tiene los bordes con una inclinación de 4 centímetros verticales a 1 centímetro horizontal. Debe seleccionarse las dimensiones de manera que H sea menor que $L/3$.

Este vertedero fue diseñado con la finalidad de disminuir el efecto de las contracciones que se presentan en un vertedero rectangular contraído. La geometría ha sido obtenida de manera que las ampliaciones laterales compensen el caudal disminuido por las contracciones de un vertedero rectangular con iguales longitud de cresta y carga de agua. Es comúnmente utilizado en sistemas de irrigación.

Esta clase de vertedero se lo considera como compuesto, debido a que se combinan las características de la escotadura en V y de la escotadura rectangular. Se utiliza cuando hace falta una medición sensible de caudales reducidos a través de la escotadura en V y se necesitan también mediciones de caudales grandes a través de la escotadura rectangular. El diseño y la calibración más complicados implican que este tipo de vertedero se limite a estudios hidrológicos complejos.

La ventaja de este vertedero es que no se necesita ninguna corrección para la contracción. La desventaja es que la precisión de la medida del caudal es menor que la que se obtiene con el vertedero rectangular o triangular.

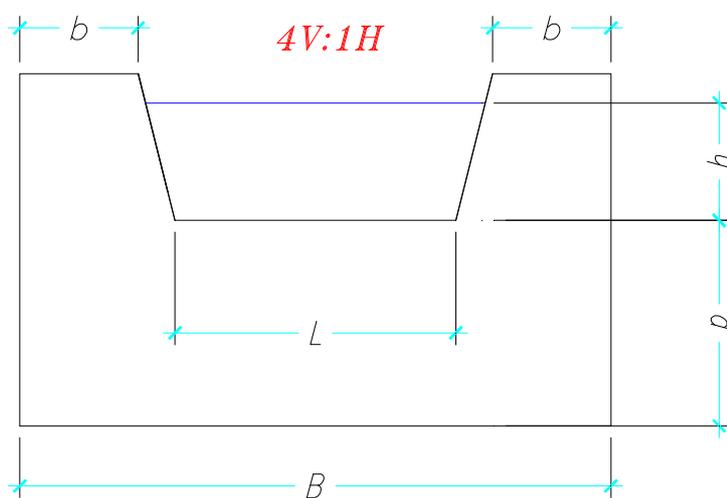
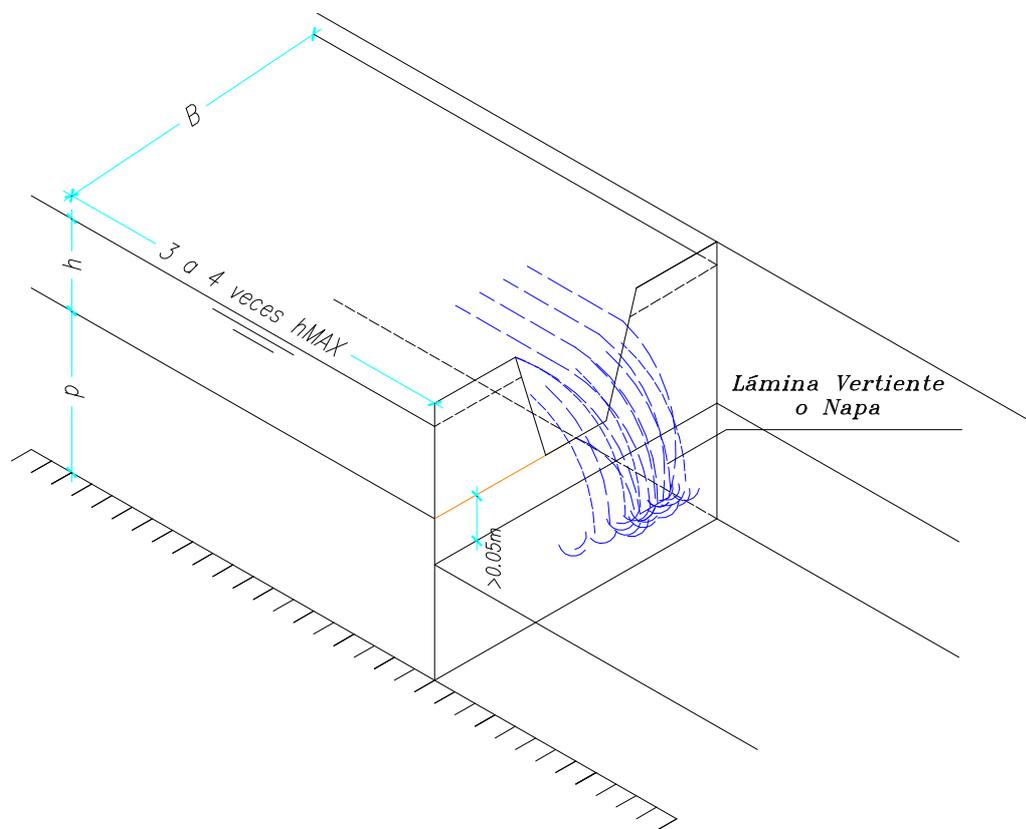


Figura 11. Vertedero Trapezoidal o Cipolletti

Elaborado por: Stephanie Almeida

4.7.2 Evaluación de la descarga

La ecuación de la descarga para vertederos trapezoidales o cipolletti, se expresa de la siguiente forma:

$$Q = 1.861 \times L \times h^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

Q: descarga, caudal o gasto (m³/s ó l/s)

L: longitud de la cresta del vertedero (m)

h: altura de carga (m).

Esta ecuación es solamente para medidas del Sistema Internacional, si se desea realizar el cálculo en otra clase de medidas se debe realizar la conversión necesaria.

La altura de carga debe ser mayor que 6 cm y menor que $L/3$. Así mismo b debe ser mayor que $2h_{MAX}$. [10]

Para el cálculo del caudal, solamente se necesita tomar la medida de L y h y aplicar en la ecuación. La medida de L que es la longitud de la cresta se la realiza con la ayuda de una cinta métrica y la medición de h que es la altura de carga se la debe realizar tomando en cuenta las consideraciones previamente mencionadas en la sección 3.3.1.

4.8 Orificios a flujo libre

4.8.1 Características

Se pretende demostrar la igualdad que existe en el alcance de un fluido que pasa por orificios ubicados a diferentes alturas pero que cumplen con ciertas condiciones.

4.8.2 Evaluación de la descarga

De acuerdo al Teorema de Torricelli, la velocidad de salida de un fluido a través de un orificio se encuentra dado por la siguiente ecuación:

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

Donde:

V: velocidad de salida del chorro (m/s²)

g: aceleración de la gravedad (m/s²)

H: altura de caída (m)

La expresión obtenida para el cálculo del alcance de un chorro que atraviesa un orificio es la siguiente:

$$x = 2\sqrt{h \times H}$$

Donde:

x: distancia horizontal del alcance del chorro (m)

h: altura de carga (m)

H: altura de caída (m)

CAPÍTULO V

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.4 Resultados obtenidos

Al realizar las prácticas en el laboratorio de hidráulica se obtuvieron los siguientes datos, utilizando los siguientes vertederos:

- ✓ Vertedero triangular de 90°
- ✓ Vertedero triangular de 60°
- ✓ Vertedero triangular de 135°
- ✓ Vertedero rectangular
- ✓ Vertedero Cipolletti

No es recomendable que el vertedero triangular posea un ángulo mayor de 90° , pero en esta práctica se utiliza para analizar el resultado y así comprobar la teoría que no es aconsejable el uso de un vertedero triangular en el caso de que se utilice un ángulo mayor.

En la práctica del laboratorio, se tomaron tres mediciones en cada uno de los vertederos para poder sacar un promedio y así obtener un caudal más exacto, como se detalla a continuación:

Vertederos	Caudal (l/s) [1]	Caudal (l/s) [2]	Caudal (l/s) [3]	CAUDAL (l/s)
Triangular 90°	0,61	0,58	0,63	0,61
Triangular 60°	0,59	0,59	0,60	0,59
Triangular 135°	1,04	1,01	1,07	1,04
Rectangular	0,61	0,62	0,59	0,61
Cipolleti	0,61	0,60	0,61	0,61

Tabla 2. Resultados de las prácticas en el laboratorio

Para los ensayos del alcance de dos chorros a través de orificios a flujo libre se obtuvieron los siguientes resultados:

En el caso 1, donde se cumple la igualdad: $h_1 = H_2$ y $H_1 = h_2$, se obtuvo el siguiente resultado:

$$x_1 = x_2 = 9,22 \text{ cm}$$

En el caso 2, donde: $h_1 \neq H_2$ y $H_1 \neq h_2$, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$x_1 = 10,25 \text{ cm}$$

$$x_2 = 12,37 \text{ cm}$$

5.5 Conclusiones

- En el proceso de la construcción del canal hidráulico se presentaron ciertos inconvenientes como fugas, dificultad en instalación, pero al realizar ajustes necesarios al momento de probar el modelo se consiguió un buen resultado final.
- Los vertederos rectangulares, triangulares, cipolletti, con orificios y el canal hidráulico funcionan correctamente, con lo que ayudará para el estudio de la materia de hidráulica mediante la implementación de prácticas en el laboratorio. Así mismo, complementará al estudio de medición de caudales y comportamientos físicos e hidráulicos de los vertederos y orificios.
- Las prácticas que se han desarrollado serán una buena herramienta para el estudio y entendimiento de los fundamentos teóricos de la hidráulica. Se debe tener en cuenta que este modelo hidráulico es pedagógico, no de investigación, como es el caso de la mayoría de modelos que se construyen.
- Se ha podido comprobar matemáticamente y visualmente la teoría de igualdad del alcance de dos chorros de agua que pasan a través de dos orificios, ubicados a diferentes alturas. Es decir que la altura de carga del chorro 1, h_1 , es igual a la altura de caída del chorro 2, H_2 , y la altura de caída del chorro 1, H_1 , es igual a la altura de carga del chorro 2, h_2 .

- En el *Caso 2* de los orificios se comprobó que el alcance del chorro 1 es menor que el chorro 2, ya que la altura de carga del chorro 1 es mayor que la altura de caída del chorro 2.

5.6 Recomendaciones

- Se recomienda dar un buen uso y mantenimiento al modelo hidráulico, como la bomba, tanque, vertederos y demás componentes. Además, se debe seguir correctamente las instrucciones para la medición de los caudales y uso del canal.
- Si no se utiliza frecuentemente el modelo se puede presentar problemas en la bomba. Como por ejemplo, si después de varios meses de no utilizar el modelo, se desea prender la bomba, ésta no se funcionará. Esto es debido a que necesita que esté en constante funcionamiento. Si esto sucede se debe desenroscar un pequeño tornillo que se encuentra en la parte posterior de la bomba; tan solo basta con un pequeño movimiento y la bomba funcionará nuevamente sin ningún problema.
- En necesario estudiar la teoría antes de realizar el experimento, para conocer el origen de las fórmulas y el significado de cada uno de los datos, así tendremos facilidad en el desempeño durante el laboratorio. Además se debe tomar en cuenta las recomendaciones que se dan para el buen uso del modelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Linsley, Ray y Franzini, Joseph. Ingeniería de los Recursos Hidráulicos. Primera Edición, México: Editorial Continental, 1980.
- [2] Domínguez, Javier. Introducción a la Hidráulica Fluvial. Capítulo 12 Modelos Fluviales. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 1998.
- [3] Trueba Coronel, Samuel. Hidráulica. México D.F.: Continental S.A., 1986.
- [4] Vega B., Daniel. Estructuras de Medición de Caudal.
- [5] Chow, Ven Te. Hidráulica de los Canales Abiertos. Primera Edición, México: Editorial Diana, 1982.
- [6] ARMCO INTERNATIONAL CORPORATION. Manual de aprovechamiento de aguas. United States: Donnelley & Sons Co., 1941.
- [7] Neto, Azevedo, J. M. y Acosta A., Manual de Hidráulica. México: Sexta edición. Harla, S. A. de C. V., 1976.

[8] Ávila, Sotelo G., Hidráulica general. Volumen I, México: Limusa S.A. Sexta edición, 1982.

[9] “Rectangular Weirs”. Discharge, head, and design calculations. Octubre 21, 2009.
<http://www.lmnoeng.com/Weirs/RectangularWeir.htm>

[10] Schlag, Albert. Hidráulica. Primera Edición, México: Editorial Limusa S.A., 1977.

TERMINOLOGÍA

- Q:** Caudal o gasto
- L:** Longitud de la cresta del vertedero
- B:** ancho del canal
- h:** altura de carga del vertedero: desnivel entre superficie libre aguas arriba y cresta del vertedero
- a:** carga sobre la cresta
- p:** altura o cota de la cresta, referida desde el fondo del canal.
- d:** distancia mínima, aguas arriba del vertedero, mayor o igual que $3h_{MAX}$
- Z:** espesor de la lámina de agua, aguas abajo del vertedero
- e:** espesor de la pared del vertedero
- H:** espesor de la lámina de agua, aguas arriba del vertedero
- Hc:** altura desde el limnómetro hasta la cresta del vertedero
- Hs:** altura desde el limnómetro hasta la superficie del agua
- C_d :** coeficiente efectivo de descarga
- x:** distancia horizontal del alcance del chorro para orificios a flujo libre
- H:** altura de caída del chorro para orificios a flujo libre
- ρ :** densidad del fluido
- μ :** viscosidad dinámica del fluido
- ν :** viscosidad cinemática

- P:** Presión
- ρ :** Densidad
- V:** Velocidad del fluido
- S:** Sensibilidad
- u:** Coeficiente de forma del vertedero
- a:** tamaño de la abertura del orificio por donde sale el líquido, diámetro.
- K_h :** representa los efectos combinados de las propiedades del fluido.
- Θ :** ángulo de escotadura del vertedero
- K_b :** representa efectos combinados de varios fenómenos atribuidos a la viscosidad y tensión superficial.
- Eu:** número de Euler
- Re:** número de Reynolds
- Fr:** número de Froude
- D:** profundidad hidráulica
- C_w :** Coeficiente de descarga
- u:** Coeficiente de forma del vertedero
- Δh :** Variación en el nivel de agua
- b_e :** ancho de la cresta del vertedero rectangular de pared delgada
- b_c :** ancho de la cresta del vertedero rectangular de pared delgada sin considerar K_b