



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

*“DISEÑO HIDRÁULICO, CONSTRUCCIÓN Y
PRUEBAS DE UN VERTEDOR DE
LABERINTO”*

Tesis para optar al Título de:

Ingeniero Civil

Asesor de tesis:

M. en I. Martín Rubén Jiménez Magaña

GÓMEZ MARTÍNEZ WENDY

QUIROZ DE LA ROSA JOSÉ MANUEL

Facultad de Estudios Superiores Aragón, Nezahualcóyotl, Edo de México, 2017.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Esta tesis la dedico a mis padres, que a lo largo de mi vida han forjado las fortalezas y virtudes que me impulsaron a llegar hasta este punto de mi formación académica.

En especial a mi madre que con esfuerzos incansables y sacrificios me apoyo moral y económicamente para alcanzar mis metas. Le agradezco su amor, paciencia incondicional y sobre todo le agradezco que nunca perdiera la fe en mí.

Agradezco su paciencia y apoyo a todos aquellos familiares que me apoyaron en este camino y creyeron en mi capacidad para lograr mis metas. Edith, Iris y Laura primordialmente.

Ha sido un gran honor trabajar de la mano con mi compañero de tesis José Manuel, a quien le agradezco infinitamente su paciencia, apoyo e impulso a lo largo de este trabajo, gracias por tus enseñanzas y experiencias.

Con gran cariño doy un gran agradecimiento a mi asesor de tesis el M. en I. Martín Rubén Jiménez Magaña, por habernos brindado la oportunidad de trabajar bajo su tutela, y compartir con nosotros su conocimiento, estando con nosotros en cada paso de la realización de esta tesis, por su tiempo, temple y apoyo gracias.

Wendy Gómez Martínez

Agradezco infinitamente a mis padres por todo el apoyo y la fe que han puesto en mí. Así mismo agradezco los grandes consejos y experiencias que mis hermanos me han obsequiado.

Un especial agradecimiento a mi compañera de tesis Wendy, que ha sido un pilar en mi formación, que con su paciencia, comprensión y cariño han logrado convertirme en una mejor persona.

Gracias a mi asesor el M. en I. Martín Rubén Jiménez Magaña por su tiempo, enseñanzas y sobre todo por contagiarme el amor por la hidráulica.

José Manuel Quiroz De la Rosa

Índice general

RESUMEN	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	2
Componentes de una presa	2
CAPÍTULO 2. OBRAS DE EXCEDENCIA	5
 VERTEDORES DE PARED DELGADA	7
Vertedor rectangular.....	7
Vertedor Triangular o en V.....	7
Vertedor Trapezoidal.....	8
Vertedor Sumergido	8
 VERTEDORES DE PARED GRUESA	9
Vertedor de Cimacio.....	9
Vertedores de caída libre.....	10
Cortinas vertedoras con caída en rápida	10
Vertedores con descarga en tiro vertical.....	11
Vertedores con descarga directa en canal	11
Vertedores de sifón	12
Vertedor de embudo	13
Vertedor de pico de pato.....	13
Vertedor de laberinto.....	14
Vertedor de tecla de piano.....	14

CAPITULO 3. ESTADO DEL ARTE	15
VERTEDOR DE LABERINTO	15
Uso del vertedor de laberinto.....	15
Geometría de un vertedor de laberinto.....	15
Elementos de un vertedor en laberinto.....	16
Dirección del eje del vertedor de laberinto.....	17
Ventajas constructivas de los vertedores en laberinto.....	18
FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS VERTEDORES EN LABERINTO	18
Antecedentes.....	18
Evolución de los vertedores de laberinto.....	19
FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS PARTES DE UN VERTEDOR DE LABERINTO	20
Canal de llegada.....	20
Perfiles de la Cresta.....	22
Apertura angular entre las paredes del vertedor.....	23
Canaletas de salida y características del flujo aguas abajo.....	24
Implementos de aireación.....	25
Flujo de descarga en un vertedor de Laberinto.....	25
Características del flujo de descarga.....	25
Oscilación de la descarga.....	27
Tensión superficial.....	28
Modelación matemática.....	28

CAPÍTULO 4. MODELOS FÍSICOS	31
Modelos físicos reducidos	31
Validación del modelo	34
<i>CAPITULO 5. Memoria de cálculo de diseño del vertedor de laberinto H=0.4m</i>	35
Coeficiente de descarga.	35
Memoria de cálculo de diseño del vertedor de laberinto H=0.2m	38
Coeficiente de descarga.	38
CAPITULO 6. Planteamiento del problema	41
Metodología	41
Construcción	42
Capítulo 7. Resultado de los experimentos	49
Determinación de coeficientes de descarga.	49
Vertedor H=0.2m.	49
Vertedor H=0.4m	51
Comportamiento de la carga contra el gasto dependiendo la geometría del vertedor	53
Para un vertedor de laberinto (h=0.4m) y un triangular	53
Para un vertedor de laberinto (h=0.20m) y un triangular	54
Para un vertedor de laberinto, triangular y rectangular virtual	55
<i>Conclusión</i>	56
<i>Anexo fotográfico</i>	57
<i>Bibliografía</i>	61

Índice de ilustraciones

<i>ILUSTRACIÓN I.1 Diagrama de un generador</i>	3
<i>ILUSTRACIÓN I.2: Plano general de una presa y sección transversal de una cortina en arco, fuente CONAGUA</i>	4
<i>ILUSTRACIÓN II.1 Vertedor rectangular</i>	7
<i>ILUSTRACIÓN II.2 Vertedor triangular</i>	8
<i>ILUSTRACIÓN II.3 Vertedor trapezoidal</i>	8
<i>ILUSTRACIÓN II.4 vertedor sumergido</i>	8
<i>ILUSTRACIÓN II.5 Vertedor de pared gruesa</i>	9
<i>ILUSTRACIÓN II.6 Vertedor de cimacio</i>	9
<i>ILUSTRACIÓN II.7 Vertedor de caída libre</i>	10
<i>ILUSTRACIÓN II. 8 Salto de ski</i>	10
<i>ILUSTRACIÓN II. 9 Perfil de vertedor con tiro vertical</i>	11
<i>ILUSTRACIÓN II. 10 Vertedor con descarga directa al canal</i>	12
<i>ILUSTRACIÓN II. 11 Perfil vertedor de sifón</i>	12
<i>ILUSTRACIÓN II.12 Perfil vertedor de embudo</i>	13
<i>ILUSTRACIÓN II. 13 Vista en planta vertedor de pico de pato</i>	13
<i>ILUSTRACIÓN II. 14 Ejemplos de geometrías para aun vertedor de laberinto rectangular, triangular, trapezoidal respectivamente</i>	14
<i>ILUSTRACIÓN II. 15 Fotografía vertedor tecla de piano</i>	14
<i>ILUSTRACIÓN III.1 Proyección de vertedor de laberinto</i>	15
<i>ILUSTRACIÓN III.2 Ejemplos de geometrías para los ciclos</i>	16
<i>ILUSTRACIÓN III.3 Estructura de un vertedor de laberinto</i>	16
<i>ILUSTRACIÓN III.4 Ciclo de un vertedor de laberinto y sus partes para los tres tipos de vertedores más utilizados</i>	17
<i>ILUSTRACIÓN III.5 Vista en planta de dos direcciones de un vertedor de laberinto trapezoidal</i>	18

ILUSTRACIÓN III.6 Vista en planta de vertedores rectangular, triangula y trapezoidal respectivamente	19
ILUSTRACIÓN III.7 Partes de un vertedor de un laberinto	21
ILUSTRACIÓN III.8 Perfiles de Creta de vertedor	22
ILUSTRACIÓN III.9 Grafica del coeficiente de descarga para el perfil de cresta Cuarto de círculo	23
ILUSTRACIÓN III.10 Vista en planta del ángulo de las paredes del vertedor con respecto a su eje	23
ILUSTRACIÓN III.11 Grafica del coeficiente de descarga para valores de alfa	24
ILUSTRACIÓN III.12 Vista de perfil de un vertedor indicando el valor correspondiente a la altura de inicio de canaleta de descarga “YA”	25
ILUSTRACIÓN III.13 Esquema de la aireación de la descarga bajo el Vertedor	25
ILUSTRACIÓN III.14 Perfiles de vertido sobre el vertedor	26
ILUSTRACIÓN III.15 Vista en detalle de la descarga de vertedor de laberinto	26
ILUSTRACIÓN III.16 Interferencia de la descarga en el ápice aguas arriba	27
ILUSTRACIÓN III.17 Vista y detalle de la oscilación de la descarga en un ápice de vertedor triangular	27
ILUSTRACIÓN IV.1 Ejemplo de un modelo con similitud geométrica	32
ILUSTRACIÓN IV.2 Ejemplo de un modelo con similitud cinemática	33
ILUSTRACIÓN IV.3 Ejemplo de modelo con semejanza dinámica	34

índice fotográfico

<i>Foto VI.1 Casa de máquinas del laboratorio de hidráulica del IIUNAM</i>	42
<i>FotoVI.2 Se comenzó limpiando el sitio de descanso del vertedor de laberinto</i>	42
<i>Foto VI.3 Se procedió con la colocación de las bases de la plantilla</i>	42
<i>Foto VI.4 Enseguida se colocó la plantilla del vertedor</i>	43
<i>Foto VI.5 Se continuó con la colocación de los soportes laterales del vertedor.</i>	43
<i>Foto VI.6 Se realizó la modelación del vertedor en acrílico en base de los siguientes planos.</i>	43
<i>Foto VI.7 Al finalizar el modelo se continuo con la instalación</i>	44
<i>Foto VI.8 Pruebas preliminares para localizar posibles fugas y sellarlas</i>	44
<i>Foto VI.9 Para poder determinar los tirantes se construyó un “puente” móvil en el cual se colocó el limnómetro para poder desplazarlo a todo lo largo de la longitud de la cresta</i>	45
<i>Foto VI.10 El sistema de canales se alimenta de un cárcamo de bombeo pasando por un vertedor triangular, el sistema es administrado con válvulas, permitiendo controlar el caudal suministrado</i>	45
<i>Foto VI. 11 Teniendo listo el modelo, el sistema de bombeo y el sistema de medición se comenzó la experimentación</i>	46
<i>Foto VI.12 Debido a la altura de diseño y a la fricción en las tuberías que alimentaban el canal de prueba, no se alcanzó un caudal mayor a 29 lt/s; en consecuencia, se decidió crear un diseño de la mitad del tamaño del paramento para poder satisfacer las condiciones y alcanzar un caudal mayor</i>	47
<i>Foto VI.13 Se continuó con la experimentación.</i>	47

Índice de tablas, gráficas y ecuaciones.

Tabla VII.1 Medición de tirantes del modelo	49
Tabla VII.2 Datos calculados	50
Tabla VII.3 Medición de tirantes del modelo	51
Tabla VII.4 Datos obtenidos	52
Tabla VII.5 Gasto y carga en modelo de 0.4m y triangular	53
Tabla VII.6 Gasto y carga en modelo de 0.2m y triangular	54
Tabla VII.7 carga y caudal de un vertedor rectangular virtual con L=1.2m	55
Grafica VII.1 eficiencia del modelo de 20cm	50
Grafica VII.2 eficiencia en modelo de 40 cm	53
Grafica VII.3 carga en relación de caudal modelo de 0.4m y vertedor	54
Grafica VII.4 carga en relación de caudal modelo de 0.2m y vertedor triangular	54
Grafica VII.5 comparación del caudal contra la carga de distintos tipos de vertedores ...	55
Ecuación para vertedor triangular (VII.1).	49
Fórmula de la Universidad Católica de Chile (VII.2).	49
Ecuación para vertedor de laberinto (VII.3)	50

RESUMEN.

Se presume que las presas que implementan vertedores de tipo laberinto, presentan mejores rendimientos y bajos costos; aumentando el volumen de descarga, siendo esto crucial para un funcionamiento más eficaz; por lo cual en esta tesis se experimentara con modelos que presenten esta característica llegando así a la conclusión que refuerce o refute estas teorías; para lo cual se desarrolló un modelo hidráulico para el cálculo empírico de los coeficientes de descarga según la ecuación de Tullís (1995); al haber más estudios con respecto a esta estructura, será de gran ayuda para diseñar y rehabilitar estas obras.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

La represa o presa consta de una barrera de concreto, piedra u otro material, que se construye sobre un río, arroyo o canal para almacenar el agua en su cauce. Luego esta agua almacenada puede derivarse a canalizaciones de riego o aprovecharse para la producción de energía mecánica o eléctrica.

Componentes de una presa

Una presa la constituyen varios componentes, ya sean naturales o hechos por el hombre, (Ilustración I.2) entre los principales se encuentran:

- Cuenca: Área de captación de la lluvia.
- Parte aguas: Es el límite de la cuenca y como su nombre lo indica separa el agua entre cuencas vecinas.
- Vaso de almacenamiento: Se forma por la presencia de la cortina, es el área en dónde queda almacenada el agua formando un lago artificial.
- Boquilla: Sitio donde se localiza la cortina.
- Cortina: Obstáculo que se interpone a la corriente para formar un vaso de almacenamiento.
- Obra de desvío: Permite desviar la corriente del río para permitir la colocación de la cortina.
- Obra de excedencias: Su objetivo es descargar el agua que está en exceso dentro del vaso de almacenamiento de manera controlada.
- Obra de toma: Su función es extraer el agua del vaso de almacenamiento en forma controlada para satisfacer una o varias demandas.
- Obra de control: Se dice que es de control ya que permite regular el agua que es desalojada por la obra de excedencias y poder dosificarla para garantizar la seguridad de las poblaciones aguas abajo.

Después de la obra de toma, existen otros elementos que son los siguientes.

- Obra de conducción: Conduce el agua que sale por la obra de toma y lo hace por medio de tuberías y/o canales.
- Obra de distribución: Como su nombre lo indica distribuye el agua.
- Obra de utilización: Por medio de ella se utiliza el agua para satisfacer la demanda.
- Canal de descarga: Su objetivo es desalojar el agua una vez que es utilizada.
- La coronación o coronamiento: Es la superficie que delimita la presa superiormente.
- La cimentación: Es la parte de la estructura de la presa, a través de la cual se transmiten las cargas al terreno, tanto las producidas por la presión hidrostática como las del peso propio de la estructura.
- Cuarto de máquinas: Es la construcción en donde se ubican las máquinas (turbinas, alternadores) y los elementos de regulación y mando.

- Turbina hidráulica: Existen principalmente tres tipos
 1. Pelton
 2. Francis
 3. Kaplan
- Generadores: La energía eléctrica se produce en los aparatos llamados generadores o alternadores.

Un generador consta, en su forma más simple de (Ilustración I.1):

1. ROTOR: Una espira que gira impulsada por algún medio externo.
2. ESTATOR: Un campo magnético uniforme, creado por un imán, en el seno del cual gira el rotor.

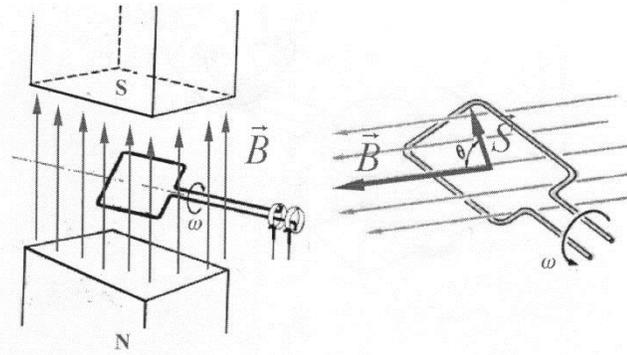


Ilustración I.1 Diagrama de un generador.

A medida que la espira gira, el flujo magnético a través de ella cambia con el tiempo, induciéndose una fuerza electromotriz, y si existe un circuito externo, circulará una corriente eléctrica.

Para que un generador funcione, hace falta una fuente externa de energía (hidráulica, térmica, nuclear) que haga que la bobina gire con una frecuencia deseada.

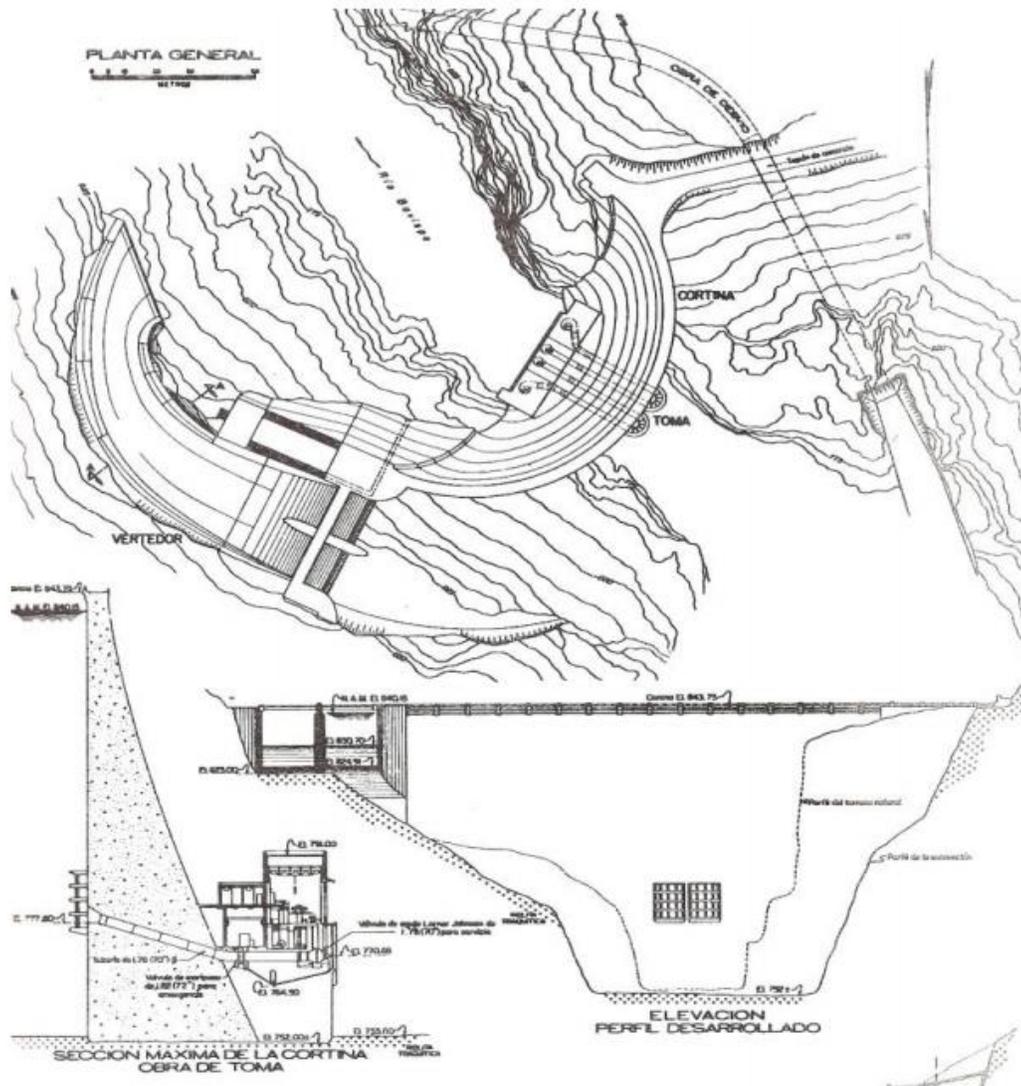


Ilustración 1.2: Plano general de una presa y sección transversal de una cortina en arco, fuente CONAGUA.

CAPÍTULO 2. OBRAS DE EXCEDENCIA.

Las obras de excedencias son estructuras que forman parte intrínseca de una presa, sea de almacenamiento o derivación y cuya función es la de permitir la salida de los volúmenes de agua de excedentes a los de aprovechamiento.

Es frecuente que los volúmenes de agua excedentes de una presa se devuelvan al cauce del propio río a través de estructuras de descarga proyectadas convenientemente.

Cuando la descarga del líquido se efectúa por encima de un muro o una placa y a superficie libre, la estructura hidráulica se llama vertedor; éste puede presentar diferentes formas según las finalidades a que se destine.

El objetivo principal de los vertedores es dejar escapar el agua excedente o de avenidas que no cabe en el espacio destinado para el almacenamiento, es decir, llevar a cabo este tipo de obras de excedencias son una parte esencial de las presas, se debe tener en cuenta las características de los tipos de vertedores existentes para tener un buen funcionamiento.

Los vertedores se pueden clasificar por su posición, forma y sistema de control. En planta estos pueden ser curvos, rectos, semicirculares en forma de “u” o redondos. De acuerdo a lo anterior se tienen tipos de vertedores como: abanico, canal lateral, embudo, Y recto. El criterio de clasificación involucra la posibilidad de control del agua, en los cuales existen los vertedores con descarga libre y descarga controlada, en los vertedores con descarga libre se produce el vertido libre al alcanzar el agua en el embalse el nivel de la cresta en el cimacio (no tiene compuertas). Posteriormente en los vertedores de cresta controlada, las descargas se controlan mediante compuertas de distintos tipos.

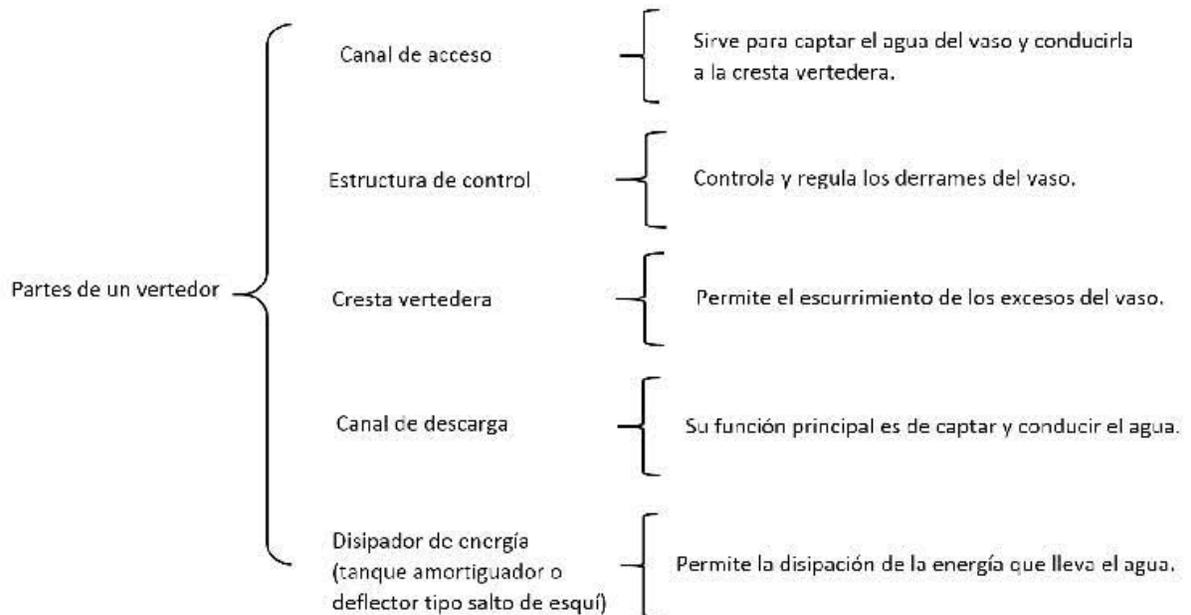
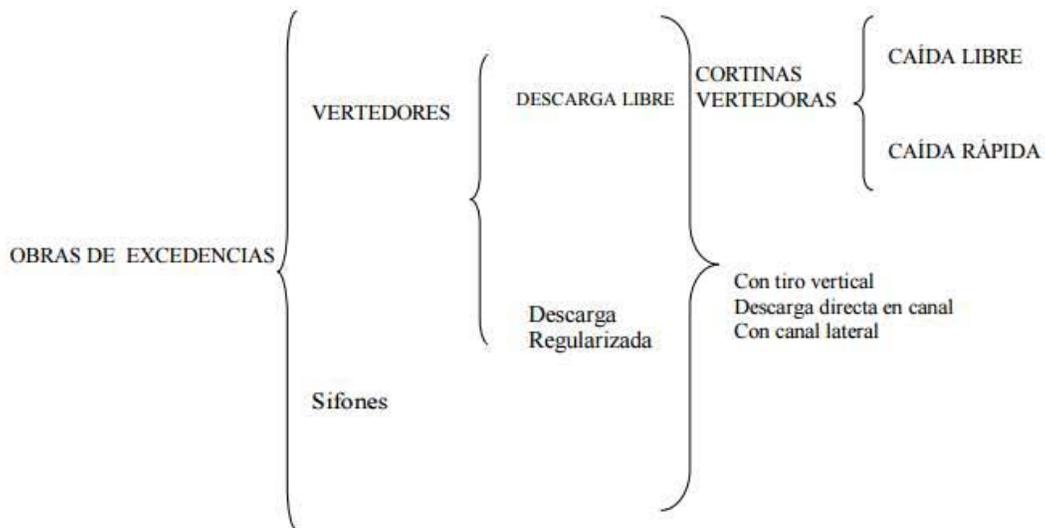
La clasificación de obras de excedencias es un tanto compleja, sin embargo, podemos desglosarla de la siguiente manera: vertedores de caída libre, vertedores de cimacio, vertedores de abanico, vertedores de canal lateral, vertedores en rápida, vertedores en embudo y sifones vertedores.

Los vertedores, como se mencionarán más adelante, se clasifican como de descarga regularizada y descarga libre (con y sin compuerta respectivamente), por ejemplo, las cortinas vertedoras, que se definen como vertedores del tipo de gravedad; ya que se localizan en una sección reducida de una cortina, sobre el cual permite el flujo de agua, en el caso en que la roca existente en el sitio sea de buena calidad y no presente alguna erosión; se pueden considerar como vertedores de caída rápida y caída libre, de lo contrario tendrá otras características como el canal lateral.

Así mismo están los vertedores de tiro vertical, los cuales se adaptarán a presas con vaso de almacenamiento muy encañonado, gastos relativamente pequeños y el agua que fluya a través de ellos esté libre de objetos que puedan obstruir.

En cuanto al vertedor de cimacio son aquellos constituidos por una cresta de control curva, que debe tener la forma de la superficie inferior de la lámina vertiente de un vertedor de cresta delgada ventilado.

En el siguiente cuadro sinóptico se describirá brevemente las partes de que esta constituido un vertedor, considerando los factores topográficos y geológicos, así como también las condiciones que se requieran en sitio de dicha construcción.



VERTEDORES DE PARED DELGADA

Se clasifican de la siguiente manera:

Vertedor rectangular:

La red de flujo de un vertedor rectangular muestra que las líneas de corriente sobre la cresta poseen una curvatura que modifica la distribución de presiones hidrostáticas.

Considere un vertedor de pared delgada y sección geométrica, como se observa en la ilustración II.1

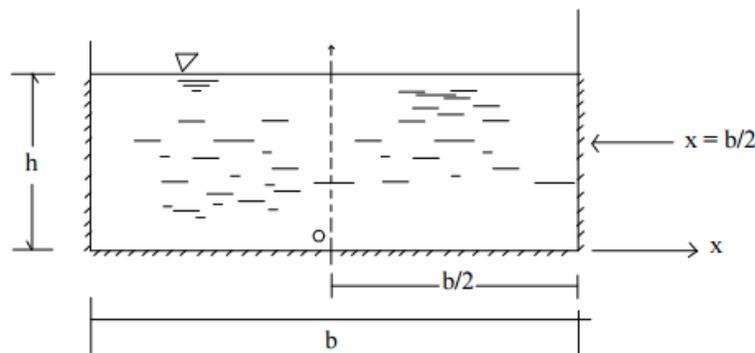
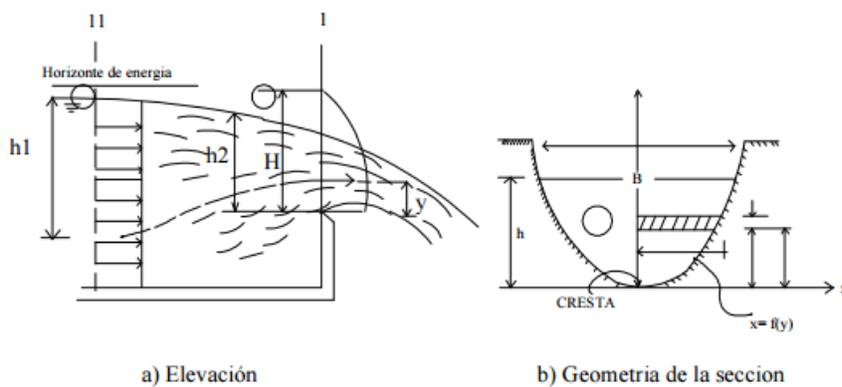


Ilustración II.1 vertedor rectangular

Vertedor Triangular o en V:

El flujo sobre un vertedor triangular empieza en un punto y tanto el gasto como el ancho del flujo aumentan como función del tirante. Un vertedor en V tiende a concentrar o enfocar la lámina vertiente y ocasiona que salte sin tocar la cara de aguas abajo. Esta característica evita un cambio en la relación carga/gasto con flujos bajos y lo hace más confiable para el aforo en estos casos. (ilustración II.2)

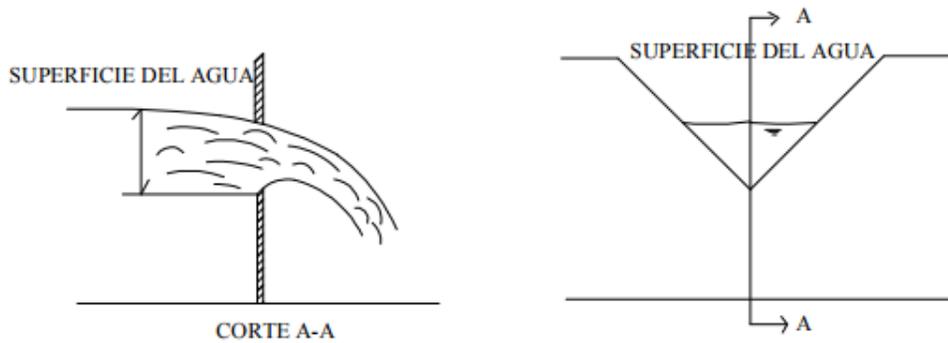


Ilustración II.2 vertedor triangular.

Vertedor Trapezoidal:

También conocido como vertedor Cipolletti en honor a su inventor, el ingeniero italiano Cesare Cipolletti., quien procuro determinar un vertedor que compensara el decrecimiento del caudal debido a las contracciones laterales por medio de las partes triangulares del vertedor, con la ventaja de evitar la corrección en los cálculos. (ilustración II.3)

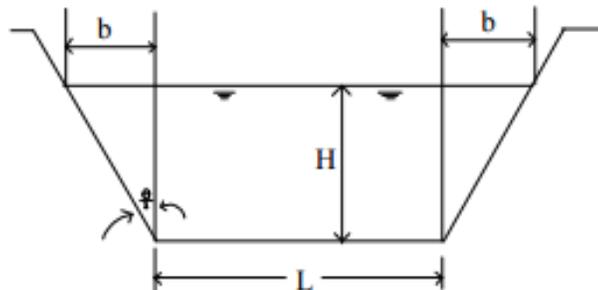


Ilustración II.3 vertedor trapezoidal.

Vertedor Sumergido:

El gasto sobre un vertedor de pared delgada sumergido, se afecta no solo por la carga H_1 , en el lado de aguas arriba sino también por la carga H_2 aguas abajo. (ilustración II.4)

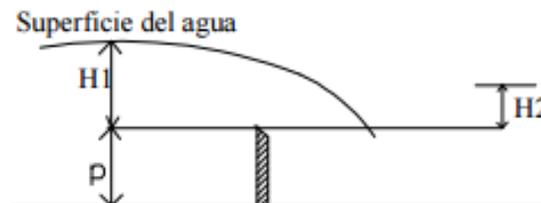


Ilustración II.4 vertedor sumergido.

Vertedores de Pared Gruesa:

Son vertedores robustos, de construcción fuerte que suelen ser parte integral de proyectos hidráulicos. El vertedor típico de pared gruesa aparece como la sección de cresta para una presa vertedora o la sección de entrada de un vertedor de demasía o un canal. Ese vertedor puede utilizarse para el aforo del flujo. (Ilustración II.5)

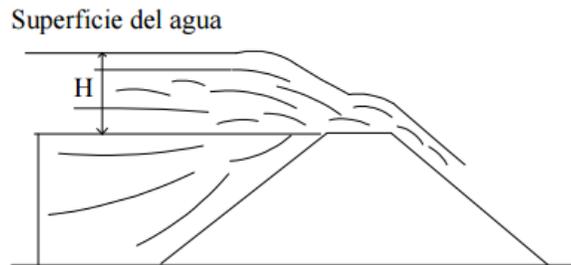


Ilustración II.5 vertedor de pared gruesa

Vertedor de Cimacio:

La finalidad de las obras de excedencias es controlar la descarga de los volúmenes de agua que se han considerado excedentes de la capacidad útil en un vaso almacenador. La obra de excedencias debe tener capacidad hidráulica suficiente y su descarga estar localizada de tal suerte que no dañe ni el talud aguas abajo de la cortina, ni el desfogue de la casa de máquinas ni cualquier otra estructura adyacente. Las superficies de la obra de excedencias deben ser resistentes a la erosión para soportar las velocidades del agua. El Vertedor es un dique o pared que intercepta la corriente, causando una elevación del nivel de aguas arriba, y que se emplea para control del nivel o para medición de caudales. (Ilustración II.6)

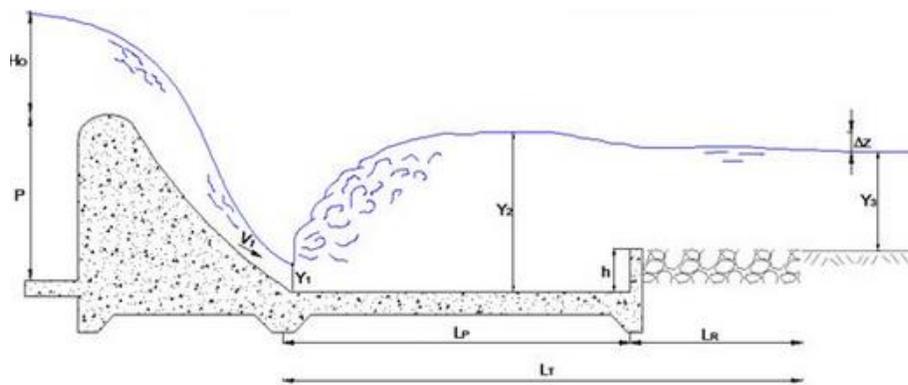


Ilustración II.6 vertedor de cimacio.

Vertedores de caída libre:

Los vertedores de caída libre están asociados a cortinas de arco o de contrafuertes, donde el espesor de concreto y la geometría general no sean favorables para guiar la vena líquida desde la cresta hasta la parte inferior; si la roca de cimentación es resistente a la erosión, el agua se puede dejar caer libremente sin protección; pero en caso contrario se debe prever alguna y amortiguar el impacto. (Ilustración II.7)

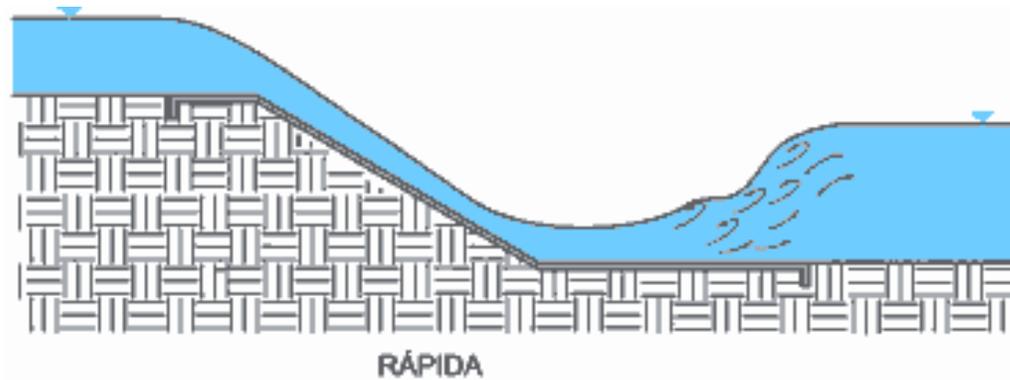


Ilustración II.7 vertedor de caída libre.

Cortinas vertedoras con caída en rápida:

Este tipo de vertedores se localiza en una sección reducida de una cortina de tipo de gravedad, sobre la cual se permite el paso del flujo de agua.

La cresta se forma para ajustarse a la vena líquida, en las condiciones de gasto máximo. Si la roca de cimentación es compacta y de buena calidad, la parte inferior de la descarga se puede diseñar como un deflector o salto de esquí; si la cimentación es erosionable se requerirá la construcción de un tanque disipador de energía. (ilustración II. 8)

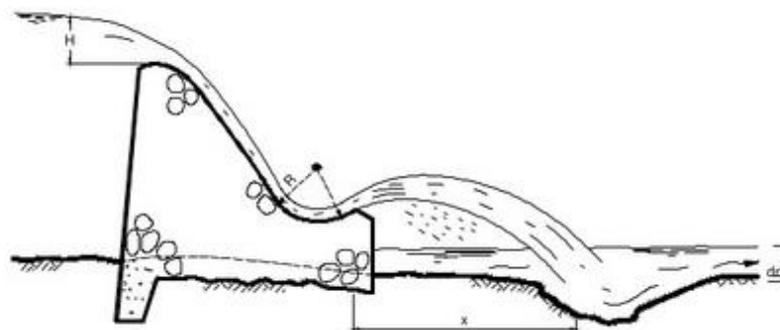


Ilustración II. 8 salto de ski

Vertedores con descarga en tiro vertical:

Los vertedores con descarga en tiro vertical tienen una entrada en embudo que conecta a un túnel, en cuyo extremo inferior puede existir un deflector o una estructura disipadora de energía.

Esta forma de vertedores se adaptarán a presas con vaso de almacenamiento muy encañonado, gastos relativamente pequeños y se requiere que el agua que fluye a través de ellos esté libre de objetos que puedan obstruirlos. (ilustración II. 9)

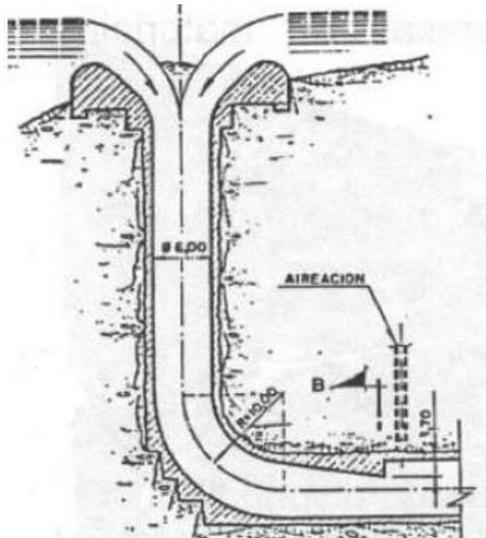


Ilustración II. 9 perfil de vertedor con tiro vertical

Vertedores con descarga directa en canal:

Se considera buena práctica no localizar este tipo de vertedores sobre cortinas de tierra y enrocamiento, debido a que estas estructuras están sometidas a algún grado de asentamiento después de terminada la construcción.

Tales asentamientos podrían provocar movimientos verticales y agrietamientos en el canal de descarga del vertedor. El agua que fluye en dichas descargas puede adquirir velocidades tan altas que cualquier desalineamiento de los planos de revestimiento, en ambos lados de la fractura, puede provocar muy altas presiones hidrostáticas en la cara inferior de la losa y levantarla, trayendo como consecuencia el fracaso de la estructura y de la cortina misma.

Esta es la razón por la que, invariablemente, los vertedores con descarga en canal se localizan en las laderas o en otros sitios apropiados, pero siempre sobre terreno natural. (ilustración II. 10)

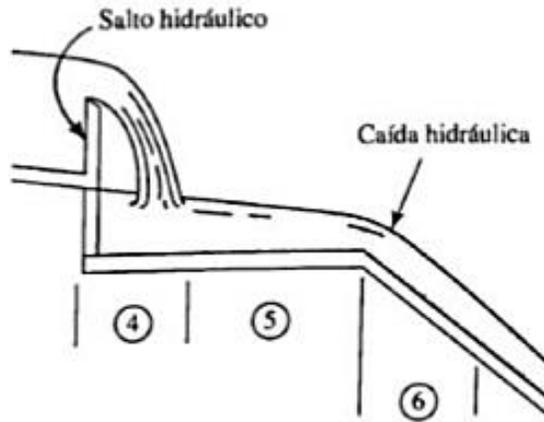


Ilustración II. 10 vertedor con descarga directa al canal.

Vertedores de sifón:

Los vertedores de demasías de sifón son sistemas de conductos cerrados en tal posición que el interior de la curva del pasaje superior tenga la altura del nivel normal de almacenamiento en el vaso. Las descargas iniciales del vertedor, al subir el nivel del vaso arriba de lo normal, tienen un funcionamiento como sifón que tiene lugar después de que se ha agotado el aire en la cámara que se forma sobre la cresta. La mayor parte de los vertedores de sifón están formados de cinco componentes, incluyen una entrada, una rama superior, una garganta o control, una rama inferior y una salida. Se instala también una ventilación para interrumpir el efecto sinfónico del vertedor, para que deje de funcionar cuando el nivel del agua de la superficie baje al nivel normal.

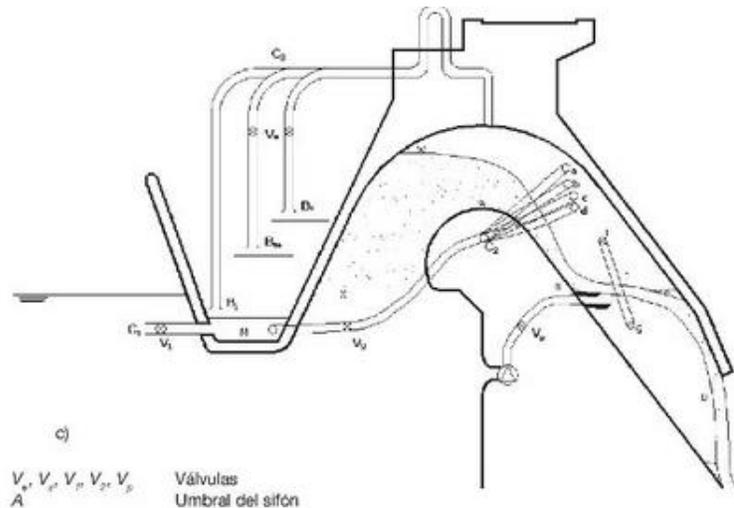


Ilustración II. 11 perfil vertedor de sifón.

Vertedor de embudo

Un vertedor de embudo es aquel donde el agua entra sobre un bordo en posición horizontal, cae en un tiro vertical o inclinado y luego corre al cauce del río de aguas abajo por un entubamiento horizontal.

Este vertedor consta principalmente de cinco elementos: una cresta ancha vertedora, transición, lumbrera vertical o inclinada, codo y túnel de descarga. Las características de descarga de los vertedores de demasías de embudo pueden cambiar al variar la carga hidráulica.

El control también varía de acuerdo con las capacidades relativas de descarga del vertedor, de la transición y del conducto. (ilustración II.12)

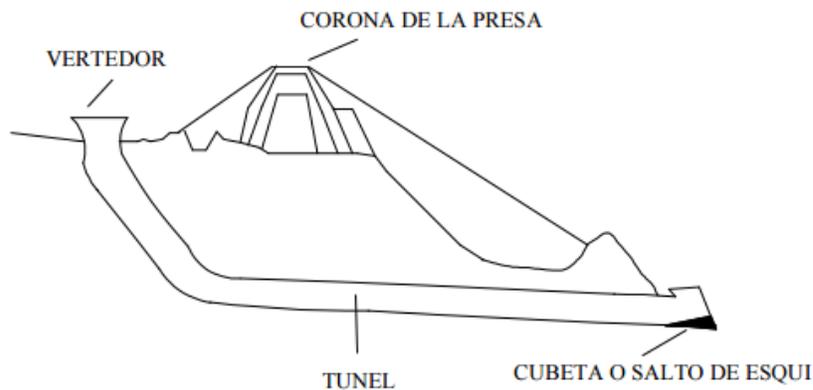


Ilustración II.12 perfil vertedor de embudo.

Vertedor de pico de pato

Este es un vertedor, con proyecciones de planta rectangular en el embalse formado por tres rectas de desbordamiento que se cruzan en ángulo recto. El diseño puede ser trapezoidal en cuyo caso el ángulo de esquina serán distintos de 90 grados. El flujo de los tres tramos de la esclusa interactúa en la porción del canal y además se transmite a través de un canal de descarga hacia una estructura terminal prevé la disipación de la energía. (ilustración II. 13)

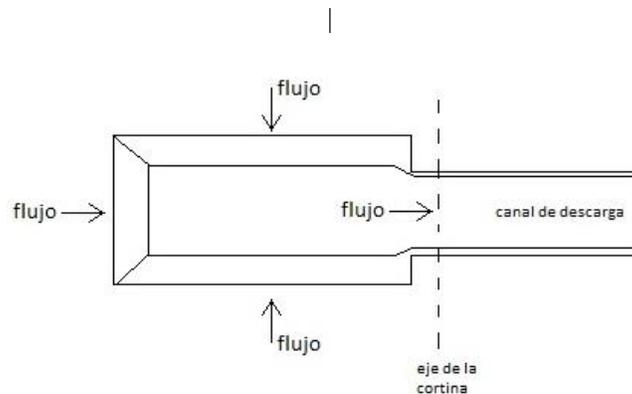


Ilustración II. 13 vista en planta vertedor de pico de pato.

Vertedor de laberinto

Las formas inusuales de vertedor son a menudo recurridas cuando es deseable aumentar la eficacia y longitud del vertedor. En el vertedor de laberinto hay un aumento en su longitud de cresta sin un aumento asociado en la anchura de la estructura. El vertedor de laberinto consiste en una serie de paredes relativamente delgadas con una forma repetitiva, en forma generalmente triangular o trapezoidal con una cara vertical ascendente. La mayor longitud de la cresta permite el paso de mayores descargas para una determinada carga. Estos son particularmente adecuados para sitios donde el ancho del vertedor y la superficie del agua, aguas arriba se limitan y mayor capacidad de descarga son obligatorio. (ilustración II. 14)



Ilustración II. 14 Ejemplos de geometrías para un vertedor de laberinto rectangular, triangular, trapezoidal respectivamente.

Vertedor de tecla de piano

El vertedor en tecla de piano presenta la misma forma en planta que un vertedor en laberinto rectangular, pero su diferencia reside en su fondo inclinado que además avanza en voladizo con respecto a los límites de la base del vertedor, este aspecto incrementa la longitud del vertedor con respecto a un vertedor en laberinto de muros verticales y mismas dimensiones de base, lo que le confiere especial interés para aplicaciones con limitado espacio en planta. (ilustración II. 15)



Ilustración II. 15 fotografía vertedor tecla de piano.

CAPITULO 3. ESTADO DEL ARTE.

VERTEDOR DE LABERINTO

Un vertedor en laberinto, se presenta en forma de “zigzag” visto en planta, toma esta geometría con el objeto de aumentar su longitud (Ilustración III.1).

Esta estructura, al presentar esta configuración posee una mayor longitud de descarga. En consecuencia, el caudal descargado es mayor, en comparación a un vertedor de cresta lineal con el mismo ancho de canal. La utilización de un vertedor de laberinto permite en algunos embalses existentes el incremento de su nivel de aguas normales, manteniendo el mismo nivel de aguas máximas. Como consecuencia del aumento en el nivel de las aguas normales, se aumenta el volumen útil del embalse. Esto ocurre al descargar mayores caudales con un nivel de carga hidráulica menor.

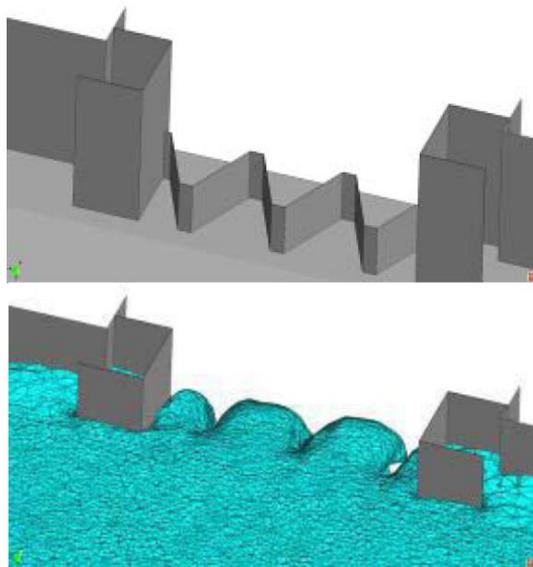


Ilustración III.1 Proyección de vertedor de laberinto.

Uso del vertedor de laberinto

Su función es el control de los niveles del agua en las obras hidráulicas cuando estos niveles superan los máximos de explotación ordinaria, mejora la capacidad de descarga en las presas, también se usa como estructura de protección de canales y plantas hidroeléctricas como dissipador de energía y para controlar la calidad de agua por aireación del flujo.

Geometría de un vertedor de laberinto

Según Khatsuria (2004), un vertedor de laberinto está formado por varios ciclos. Un ciclo es una secuencia de paredes y ápices que forman una geometría similar a una onda.

El tipo de ciclo determina el tipo de vertedor de laberinto. Las formas más comunes se observan en la Ilustración III.2.

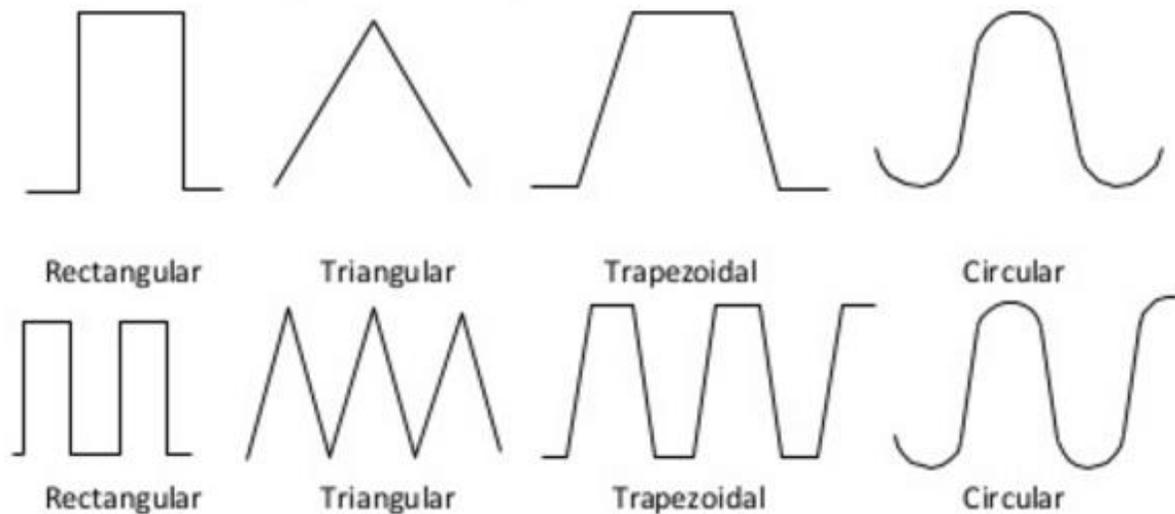


Ilustración III.2 Ejemplos de geometrías para los ciclos.

Elementos de un vertedor en laberinto.

Los vertedores de laberinto están compuestos por tres grupos de elementos. Desde aguas arriba hasta aguas abajo, está el canal de llegada o llamada, el canal del vertedor y finalmente todos sus elementos (ciclos) (Ilustración III.3). Un ciclo de vertedor (Ilustración III.4) está formado por paredes de distintas longitudes y ubicaciones en la configuración de vertedor rectangular, las paredes se dividen en paredes laterales y ápices aguas arriba y ápices aguas abajo. Las diferentes partes que forman los ciclos y la cantidad de estos influyen en el comportamiento de la descarga. Se citan las partes del vertedor trapezoidal porque es el más complicado (Ilustración III.3).

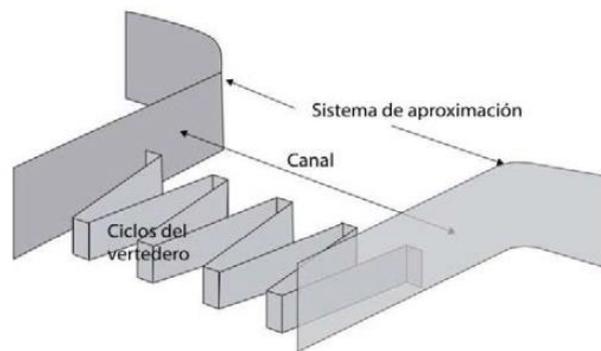


Ilustración III.3 Estructura de un vertedor de laberinto.

En un ciclo de vertedor de laberinto (trapezoidal), los ápices ubicados aguas arriba y aguas abajo se denominan “ $2a$ ”, las paredes laterales se denominan “ B ”, el ancho de ciclo se denomina “ Wc ” y la altura sobre el vertedor se denomina “ P ”. Existe un ángulo “ α ”, medido desde el eje del vertedor a la pared (Ilustración III.4).

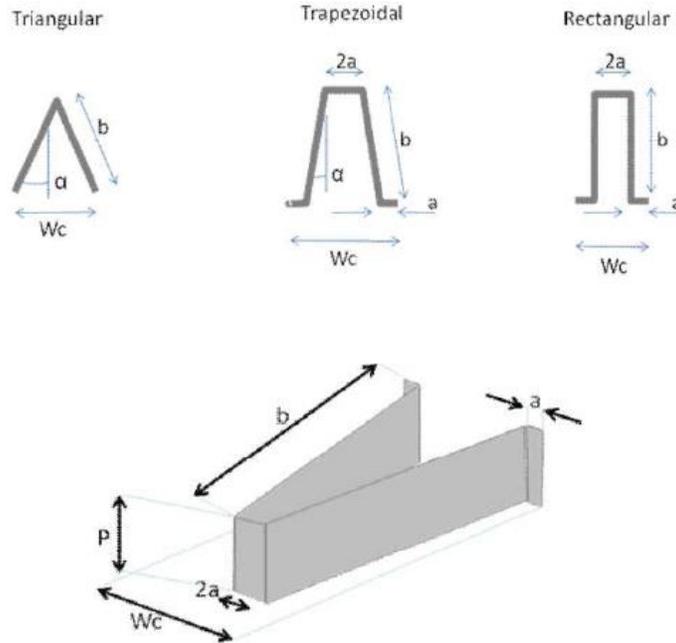


Ilustración III.4 Ciclo de un vertedor de laberinto y sus partes para los tres tipos de vertedores más utilizados.

Dirección del eje del vertedor de laberinto

Tulis (1995) plantea que la dirección del eje de un vertedor de laberinto es aquella orientación que indica la ordenación de los ciclos, según su vista en planta. La implementación de vertedores de laberinto utiliza geometrías de ejes diferentes, por lo que la dirección del eje del vertedor es particular para cada estructura.

La variación de la dirección del eje se realiza para incrementar la longitud del vertedor o incorporarle más ciclos y, por consecuencia, el caudal de descarga mejora utilizando el mismo ancho disponible. Las direcciones utilizadas pueden ser recta a una curva o la combinación de ambas (Ilustración III.5).

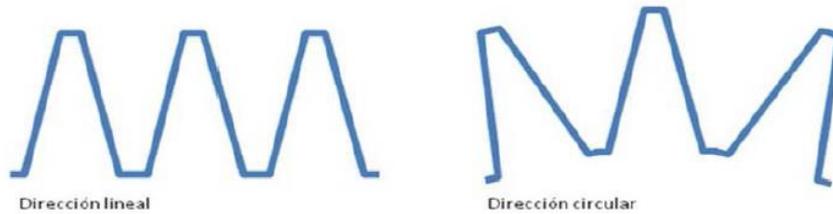


Ilustración III.5 Vista en planta de dos direcciones de un vertedor de laberinto trapezoidal.

Ventajas constructivas de los vertedores en laberinto

La implantación de estos dispositivos proporciona una serie de ventajas que van más allá de lo funcional, como las facilidades constructivas y los bajos requerimientos de los materiales utilizados. Cabe mencionar que la utilización de encofrados sencillos y factibles de realizar sin la necesidad de complicadas formas o acabados es parte de estos mecanismos.

FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS VERTEDORES EN LABERINTO

Antecedentes

La eficiencia de un vertedor depende de su geometría, la cual se expresa en el coeficiente de descarga de la ecuación que relaciona la carga hidráulica con el caudal descargado.

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H^{1.5}$$

Las partes que conforman un vertedor de laberinto pueden variar geoméricamente en su diseño, y se desarrollan de acuerdo a los requerimientos de operatividad o topografía que han llevado a mejorar muchas de las características y tipos que se presentan actualmente. Usualmente este tipo de vertedor, tiene como partes fundamentales el canal de llamada, la estructura de laberinto, y el conjunto de canaletas de salida y la rápida.

El vertedor de laberinto ha experimentado variaciones mediante investigaciones y observaciones realizadas a modelos y prototipos. En sus inicios comenzaron siendo paredes dispuestas en forma de medio-oval y rectángulo según su vista en planta; hasta los actuales diseños de ciclos de paredes angulares.

La necesidad de mejorar la descarga manteniendo el mismo valor de carga hidráulica, ha sido la causa de la constante modificación de los componentes de los vertedores de laberinto. Estas características dimensionales se estudian mediante un modelo hidráulico para observar cómo influyen en el coeficiente de descarga. Estas partes se refieren al conjunto de estructuras que conducen el flujo desde el almacenamiento hasta el canal de alivio. En prototipos puede presentar

varias configuraciones determinadas por los requerimientos o disponibilidades topográficas del sitio, o el área de inicio del canal de alivio.

Evolución de los vertedores de laberinto

Según Cordero et al (2007) los vertedores de laberinto por requerimientos topográficos y operativos han registrado variaciones, que buscan siempre aumentar el coeficiente de descarga. Los primeros vertedores de laberinto que se implementaron en embalses tenían forma de U o forma rectangular según su vista en planta (Ilustración III.6). A la primera modalidad citada, se le llamo Duckbill (en inglés) o pico de pato, debido a la similitud de su ciclo con el pico del ave. Este vertedor bajo esta configuración, incrementó el coeficiente de descarga en comparación a un vertedor de cresta recta en un mismo ancho de canal. Estas alteraciones dieron lugar a varios ensayos de vertedores de laberinto con múltiples variaciones, buscando aumentar la longitud efectiva de descarga con diversas configuraciones de ciclos.

La modificación de la disposición física de los ciclos produjo como consecuencia el vertedor tipo triangular (Ilustración III.6), que como su nombre lo indica, hace referencia a la disposición triangular de sus paredes según su vista en planta. La relación entre sus paredes no viene por perpendicularidad y paralelismo, sino por una relación angular. Con esto aumenta levemente el valor de sus volúmenes de descarga. Sin embargo, al haber interferencia en la descarga en los ápices, se producen desempeños irregulares, como lo señala Tullis (2001).

Finalmente, con la incorporación de elementos propios del tipo “corrugado”, como los ápices, en la estructura denominada triangular, se produce un vertedor de laberinto cuyas paredes están dispuestas con un ángulo, pero en los extremos de estas se dispone un ápice formado por una pared de longitud corta. Este ápice que se genera tanto aguas arriba como aguas abajo, es perpendicular al flujo. Esta configuración se denomina trapezoidal (Ilustración III.6), y presenta un comportamiento de vertido similar a los otros tipos, mostrando una notable mejora en el coeficiente de descarga con respecto a sus predecesoras. Por su ventajoso diseño y eficiencia, actualmente es utilizada en las obras de excedencia desarrolladas para embalses, en diseños y rehabilitaciones. Al poseer las características antes descritas, posee facilidades constructivas, así como la facultad de permitir un fácil mantenimiento por sedimentación.

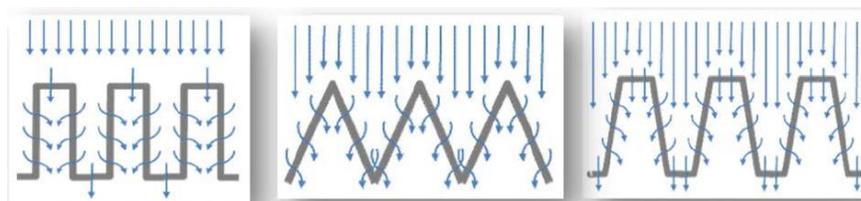


Ilustración III.6 Vista en planta de vertedores rectangular, triangular y trapezoidal respectivamente.

Se han diseñado numerosas obras de excedencia usando este tipo de estructura para el vertedor, en los cuales se ha variado la cantidad de ciclos y la dirección de estos. La variación de la dirección de los ciclos es realizada con el propósito de poder ampliar la longitud efectiva o la de añadir más ciclos. Se puede proyectar la orientación de los ciclos de una manera lineal, ubicándose uno al lado del otro considerándose entre ellos un eje perpendicular al flujo. En otros casos este eje puede dibujar un arco, una circunferencia o combinaciones de ambas. También estas variaciones obedecen directamente a necesidades topográficas o en el caso de rehabilitaciones, la menor intervención posible de la obra de excedencia previa.

FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS PARTES DE UN VERTEDOR DE LABERINTO

Canal de Llegada.

La llegada se produce a través de una estructura de conducción del flujo hacia el vertedor. Para los vertedores de laberinto, este mecanismo fue ignorado al principio de las primeras investigaciones, sin tomar en cuenta que este podría influir en la descarga del vertedor. Esto ocurrió por la construcción del canal de llamada en prototipos sin estimar que se estaba trabajando con un nuevo tipo de vertedor, que se relacionaba con el flujo de una manera no estudiada. Se diseñaron varios sistemas con diferentes aproximaciones para implementarse en obras de excedencia, pero la acción de los vertedores de laberinto con respecto a la llegada no tuvieron una base de argumentos estudiados para las posibles acciones de diseño que se pudiesen tomar en estas estructuras.

Como se estableció previamente, existe una serie de canaletas trapezoidales como conductores del flujo descargado, para la configuración del vertedor tipo trapezoidal. También existen una serie de canaletas en la aproximación que debe tener las mismas dimensiones que las canaletas de salida. Estas canaletas están unidas al lecho de la aproximación que conecta a su vez con el lecho del almacenamiento. Esta formación de estructuras de llegada, son las típicas comprendidas para el canal de llegada. (Ilustración III.7).

El canal de llegada comprende las obras laterales y el lecho que conduce el flujo desde el almacenamiento hasta el vertedor. Las paredes del canal de llegada se proyectan perpendicularmente al lecho de la estructura y ambas dependen geoméricamente una de la otra (Ilustración III.7).

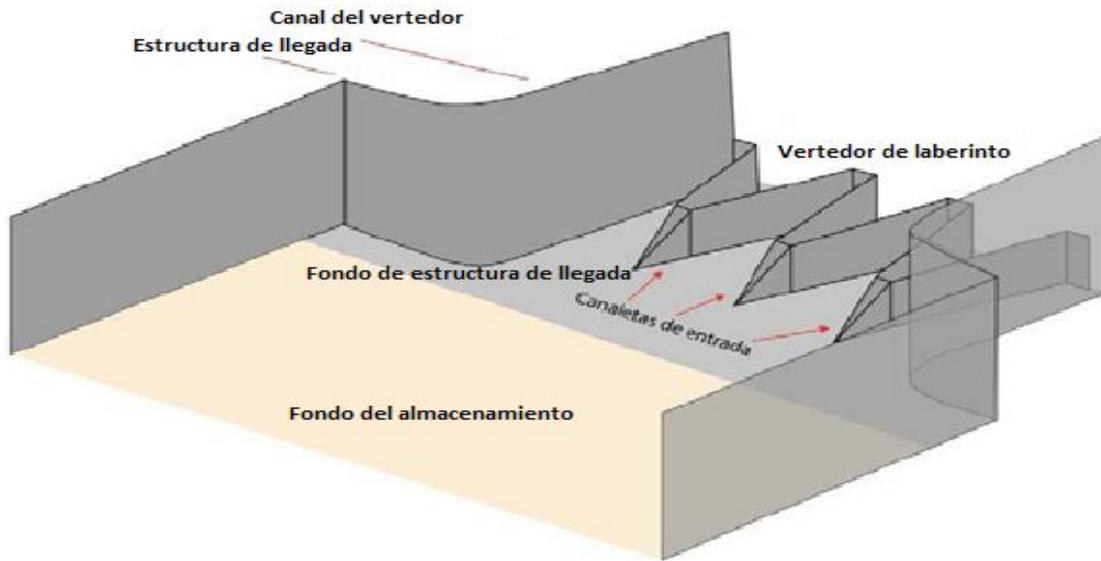


Ilustración III.7 Partes de un vertedor de un laberinto.

Las canaletas de aproximación solo dependen en su dimensionamiento de la geometría dada a la estructura del vertedor. La estructura de llegada se diseña en función de los requerimientos del caudal a transitar y la topografía del lugar.

Considerando que muchos prototipos manifestaron valores de coeficientes que no se relacionaron con los modelos realizados, se iniciaron una serie de investigaciones que se centraron en las relaciones entre ellos.

Taylor y Hay (1970) encontraron una brusca diferencia en el valor del volumen de descarga entre lo medido en un modelo y su prototipo, y explicaron que esta diferencia era causada por la estructura de llegada. Megalhaes (1985) también fue partícipe de estudios en los cuales se observaron considerables diferencias de coeficientes de descarga en estudios de modelo y prototipo. Cassidy (1983), quien profundizó los estudios de Taylor, realizó comparaciones entre un prototipo diseñado para la represa de Ute y su respectivo modelo; ubicando la causa de la diferencia de magnitudes en la observación de este dispositivo. Corroborando las investigaciones de Taylor encontrando en un prototipo altos coeficientes de descarga, en comparación a los determinados inicialmente en el modelo. A su vez, condujo investigaciones donde descartó el uso de estructuras de llegada y dispuso la proyección del vertedor dentro del almacenamiento. La cual no estaba estimada para vertedores de laberinto. Esto produjo que se iniciaran investigaciones en el área, teniendo como punto de enfoque la implementación de varios tipos de estructuras para el canal de llegada y su relación con el vertedor.

Perfiles de la Cresta

Los perfiles de cresta son el acabado geométrico que poseen las paredes del vertedor en su parte superior, y son de relativa importancia, considerando que el diseño de estos influye en el coeficiente de descarga del vertedor. En una vista de perfil de la pared del vertedor, se pueden observar las dimensiones que este componente posee en el área ubicada en la cima, que se denomina cresta. Este acabado de la pared del vertedor restará en contacto con el caudal circulante pues de un lado de este, se encontrara el volumen del flujo a descargarse; y del otro lado, la lamina de la descarga. La importancia que debe tener este acabado es muy relevante pues influye sobre la descarga.

El diseño óptimo de un perfil de cresta es de importancia dado que algunos vertedores han presentado funcionamientos deficientes por adoptar un perfil de cresta no acorde. También se han desarrollado y sometido a experimentación diseños particulares, para determinar coeficientes de descarga y patrones de diseño.

Entre los perfiles desarrollados se pueden destacar muchos señalados por Falvey (2003) y Megalhaes (1985). Todos presentan características particulares en cuanto a su dimensionamiento geométrico y formas utilizadas (Ilustración III.8). Generalmente, todas las tipologías tienen una tendencia a trabajar aprovechando el espesor base de la pared de vertedor, aplicando un acomodo del borde de descarga, que incluso se puede interpretar con una finalidad constructiva. Se busca por medio de un perfil de cresta adecuado hacer más eficiente la descarga, evitando que el diseño de la pared de vertedor se vuelva más complicado. Esto último que indicaría un encofrado laborioso y, en consecuencia, un mayor costo económico.

La figura III. 8 muestra los diferentes perfiles de cresta, tales como: **a)** Pared delgada, **b)** Superficie plana, **c)** Cuarto de circulo, **d)** Perfil de lamina vertiente y **e)** Medio circulo. Este último presenta dos configuraciones: una de espesor constante a lo largo del elemento y otra de espesor variante, mostrándose ancha en la base y disminuyendo a una tasa de decrecimiento constante a medida que aumenta su altura. Para todas se realiza una breve descripción de su configuración física, y funcionamiento hidráulico.

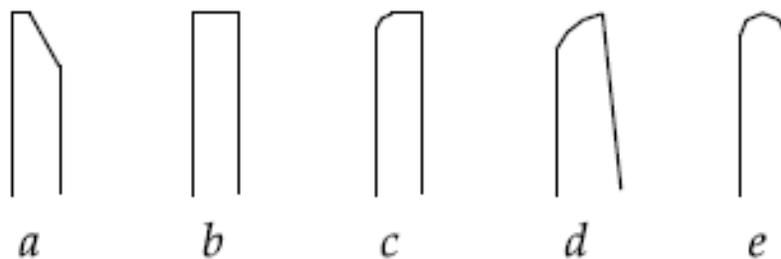


Ilustración III.8 Perfiles de Cresta de vertedor.

En el perfil cuarto de círculo se introduce un elemento geométrico, un cuarto de circunferencia tangente al muro en la parte adyacente a la descarga. Con respecto a la descarga, se espera que esta vierta libremente, lejos de efectos tales como la cavitación o la persuasión, efectos que desaparecen al producirse el aumento del volumen de caudal descargado con respecto al tipo de cresta Cuarto de círculo, Tullis (1995) desarrollo numerosas pruebas con la utilización de este perfil, cuyos resultados representan una referencia para diversos modelos experimentales. Muchos de sus resultados e indicaciones señalan el uso de este tipo de perfil (Ilustración III.9).

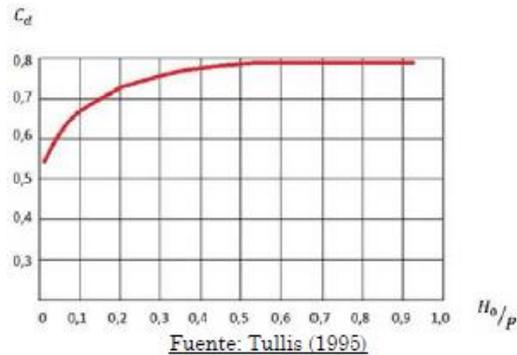


Ilustración III.9 Gráfica del coeficiente de descarga para el perfil de cresta Cuarto de círculo.

Apertura angular entre las paredes del vertedor

Se ha mencionado la existencia de un Angulo entre las paredes de mayor longitud del vertedor, según la configuración geométrica de la estructura utilizada, bien sea triangular o trapezoidal. Su magnitud es medida en grados desde el eje del ciclo hasta la dirección de la pared (Ilustración III.10). Este término influye sobre la descarga y el respectivo coeficiente.



Fuente: Delgado (2009).

Ilustración III.10 Vista en planta del ángulo de las paredes del vertedor con respecto a su eje.

Tullis (1995) llevo a cabo modelos experimentales en los cuales se determinan una serie de valores para el Angulo alfa de las paredes en forma trapezoidal (Ilustración III.11). Los modelos desarrollados por estos autores evalúan varios valores de esta configuración angular, y sus

resultados se expresan en graficas en las cuales claramente se pueden percibir diferencias en el coeficiente de descarga. Estos valores angulares varían dentro de un rango de 2°.

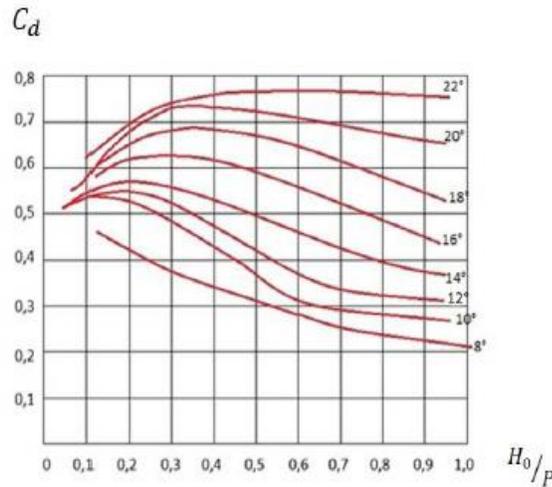


Ilustración III.11 Grafica del coeficiente de descarga para valores de alfa.

Donde C_d es el coeficiente de descarga obtenido y H_0/P es un coeficiente adimensional obtenido del cociente entre la carga sobre el vertedor (H_0) y la altura del vertedor (P).

Canaletas de salida y características del flujo aguas abajo.

Otra serie de elementos de importancia en el vertedor son las canaletas de salida, o la canaleta de descarga según su otra designación. Su forma se obtiene por el dimensionamiento de los elementos de los ciclos del vertedor. En las canaletas de descarga puede ocurrir un suceso denominado sumergencia, o aumento del nivel del flujo descargado sobre la cresta del vertedor, el cual afecta la descarga y disminuye el coeficiente de descarga. Es un efecto totalmente negativo en la descarga y un suceso con probabilidades de ocurrir en vertedores de laberinto. El objetivo de muchos estudios sobre sugerencia del vertedor de laberinto es la de generar parámetros de diseño para evitar este efecto en las canaletas de descarga.

Esta canaleta se repite en igual dimensión para cada ciclo que compone el vertedor, excepto por aquellos que presenten una orientación del eje de los ciclos en una formación asimétrica. El propósito fundamental de estas canaletas es la recolección del flujo descargado para conducirlo hacia un canal aguas abajo. Cada uno de estos elementos debe tener la capacidad de evitar la sumergencia del vertido, recoger el flujo de todas estas canaletas y conducirlo a un estanque de disipación o incorporarlo a un curso de agua.

El término para designar la altura de inicio de la canaleta de salida es Y_a , medido desde el lecho de la aproximación hasta el inicio de este elemento (Ilustración III.12).

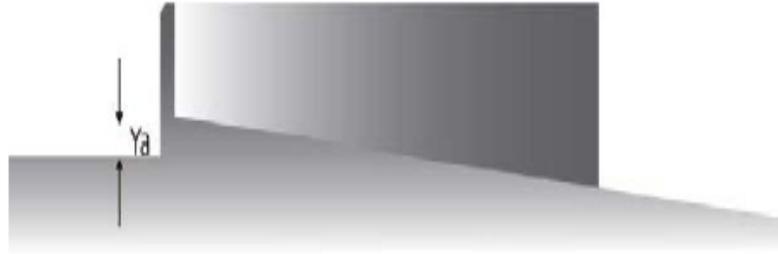


Ilustración III.12 Vista de perfil de un vertedor indicando el valor correspondiente a la altura de inicio de canaleta de descarga “Ya”

Implementos de aireación.

Hauser (1996) explica que la aeración del flujo es importante en un vertedor de laberinto, dado a que mejora la descarga, al compensar las presiones negativas o presiones de contracción que se generan bajo la lamina de descarga (Ilustración III.13). Esta compensación genera una mayor longitud efectiva de descarga, lo que aumenta el área de la lámina de exposición y por lo tanto de aeración.

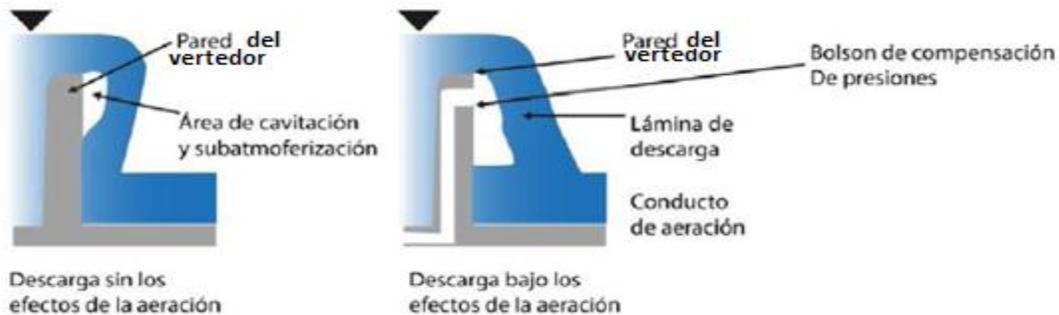


Ilustración III.13 Esquema de la aireación de la descarga bajo el vertedor.

FLUJO DE DESCARGA EN UN VERTEDOR DE LABERINTO

Características del flujo de descarga

Se ha descrito un tipo de flujo particular para estas estructuras, las cuales están en función de las líneas de corrientes que dibujan, donde esta característica es particular para este tipo de vertedor. No se puede considerar un único perfil de vertido, como las que se observan en los vertedores convencionales, pues la estructura que los regula no tiene una posición paralela ni perpendicular a la dirección del flujo. En vertedores de laberinto el flujo es tridimensional y no bidimensional. Por esta razón, las líneas de corrientes tienen trayectorias alternativas y muy variantes, en tres direcciones, y con velocidades en las mismas direcciones (Ilustración III.14 y III.15).

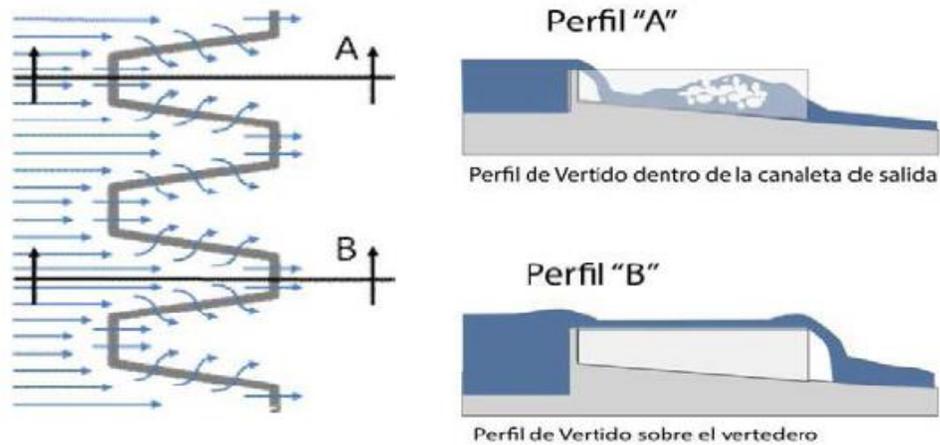


Ilustración III.14 Perfiles de vertido sobre el vertedor.



Ilustración III.15 Vista en detalle de la descarga de vertedor de laberinto.

Crookston (2010) explica que uno de los aspectos destacables es la aeración del flujo de descarga en la estructura de alivio, dando una mejora al funcionamiento de la misma. En algunos casos los diseños de vertedores de laberinto se enfocan en el flujo, para producir aeración en el momento de alivio. Para esta acción se han desarrollado perfiles descrestas o sistemas de suministro de aire cuyo desempeño sea la mejora del flujo.

Por otra parte Khatsuria (2004) menciona que un vertedor de laberinto puede presentar segmentos de descarga con diferente carga hidráulica y volúmenes de caudal diferentes por la aproximación del flujo. En los vértices de las paredes del vertedor, se pueden presentar situaciones de descarga en varias direcciones. En la situación de descarga del flujo puede producirse que algunos segmentos tengan que descargar mayores cantidades de caudal que otros. El flujo que se descarga

por el ápice del vertedor tiende a producirse como si se tratase de un vertedor de cresta viva. Pero en el caso de la pared en posición angular con respecto a la dirección del flujo, como ocurre en el tipo trapezoidal, la longitud de descarga se incrementa y el fluido tiene mayor espacio para descargar. Esto trae como consecuencia que los valores de la carga de agua se incrementen en los trayectos perpendiculares al flujo y disminuya en los trayectos angulares (Ilustración III.16).



Ilustración III.16 Interferencia de la descarga en el ápice aguas arriba.

Oscilación de la descarga

El flujo descargado por el vertedor en un aliviadero de laberinto puede verse afectado por sucesos inusuales producidos por una vibración en la lamina de flujo descargada. Esto ocurre con bastante regularidad en prototipos y modelos, en los cuales la oscilación puede producir descargas no descritas, así como oleajes variantes e impredecibles.

Por otra parte, también se menciona la posibilidad de socavación o erosión de la estructura por causa de la constante variación de la descarga sobre los canales de recolección de las aguas (Ilustración III.17).



Fuente: Tullis (2006)

Ilustración III.17 Vista y detalle de la oscilación de la descarga en un ápice de vertedor triangular.

Falvey (2003) señala que el flujo bajo los efectos de la vibración, se presenta en magnitudes bajas de caudal descargado, pero al incrementarse el flujo, el comportamiento de la lámina de agua en algunos casos se estabiliza hasta mantener una descarga uniforme.

Para que ocurra una descarga uniforme, se suministra aire bajo el flujo para compensar las presiones generadas por la lámina de la descarga. Pudiéndose generar oscilaciones eventual o permanente. Este tipo de flujo está acompañado por variaciones como incrementos y decrecimientos de la descarga, así como fluctuaciones pronunciadas en el canal de descarga.

Tullis (2001) considero un rango del coeficiente de descarga bajo los cuales puede ocurrir la aparición de este inconveniente, que establece el coeficiente L/H_o . En este caso L es la longitud efectiva de descarga, que puede tener un rango de 50% hasta 100 %. Esta relación guarda una correspondencia con el coeficiente H_o/P por la utilización de la carga hidráulica en su determinación, pero ninguno de los autores señalo una equivalencia de un coeficiente a otro.

Tanto Falvey (2003) como Tullis (2001) observaron la presencia de la oscilación de la descarga en un vertedor de laberinto, mostrando divergencias con el prototipo respectivo donde no se observo oscilaciones. Las diferencias entre modelo y prototipo generaron distintas hipótesis, pero la conclusión más relevante es que la tensión superficial absorbió la generación de la oscilación en los modelos. Esto lleva a considerar posibles resultados erróneos que se pueden dar por la tensión superficial, indicando que en montajes experimentales esta característica necesita ser corregida.

Tensión superficial

La tensión superficial es una característica general de los fluidos en canales en superficie libre y su incidencia en la caracterización del flujo depende de las variables estructurales. Es así como la incidencia de la tensión superficial en un prototipo ya construido de grandes dimensiones es prácticamente nula. Pero en el análisis del flujo de algunos modelos de vertedores de laberinto, este efecto es muy notable e incide en los resultados experimentales. En mayor medida esto se da por el hecho de que las dimensiones para un modelo hidráulico se modifican en virtud de mantener parámetros de similitud analítica.

Modelación matemática

En paralelo a la modelación física para la resolución de problemas hidráulicos complejos, los ingenieros hidráulicos dispusieron de otra herramienta para la misma finalidad desde la década de los 60 del siglo pasado que era la aplicación general de los modelos matemáticos a la hidráulica del flujo en lámina libre, con el advenimiento y desarrollo de las computadoras y métodos de programación.

El uso de la modelación matemática aplicada a los problemas de la ingeniería del agua, y de manera simplificada, tuvo, a su vez, dos posibilidades: la utilización de modelos comerciales

desarrollados por instituciones públicas o privadas que tratan las ecuaciones de comportamiento de una forma bastante simplificada para hacer asequible su uso (convenientemente revisadas, eso sí) o la elaboración de modelos ad hoc con una aplicación válida, en el mejor de los casos, a un muy reducido número de casos que motivaron la necesidad de esos modelos específicos (estos modelos fueron desarrollados sobre todo desde centros de investigación y entornos universitarios).

Pese al tiempo transcurrido (casi quince años), las explicaciones expuestas en Mateos (2000) sobre el uso de ambas herramientas para la resolución de problemas hidráulicos complejos (las características de unos y otros, sus ventajas e inconvenientes o las prognosis de futuro sobre el empleo de ambos) tienen plena actualidad hoy en día (ver también Toobes y Chanson, 2011).

De esta manera, entre las ventajas de la modelación matemática se pueden destacar la reducción de tiempo y de costes de ejecución frente a los modelos físicos. Además permite abordar estudios con mayor generalidad que posibilitan acotar el estudio, aunque con menor precisión que la modelación física. La modelación matemática genera, además, información para todo el dominio de cálculo. También posibilita observar y analizar muchas variables del flujo como la velocidad, la presión, la disipación turbulenta y la vorticidad entre otras. La observación y cuantificación de ciertos fenómenos puede resultar muy difícil en los modelos físicos. Ello no significa que los modelos matemáticos puedan sustituirlos en cualquier tipo de obra hidráulica, sino por el contrario, pueden complementarse aprovechando la potencialidad que cada uno posee.

La modelación física, por su parte, sigue presentando importantes ventajas frente a la numérica, como por ejemplo, el no estar limitados por la potencia de cálculo, una mejor aproximación al proceso físico, al no tener que emplear métodos numéricos para resolver las ecuaciones que rigen el problema, una inmediata interacción con el modelo que facilita la búsqueda de mejoras hidráulicas y además permite visualizar e interpretar fenómenos hidráulicos de gran complejidad.

Con todo, en la actualidad se ha generalizado el empleo de modelos numéricos unidimensionales y bidimensionales en estudios de flujos en lámina libre, siendo menor, aunque con un crecimiento importante, el empleo de modelos numéricos tridimensionales para estudios de interacción de flujo con estructuras. Para todos estos estudios hay disponibles tanto modelos de carácter comercial como desarrollados en centros de investigación públicos (Garrote et al., 2008). El desarrollo de las nuevas técnicas de computación está permitiendo abordar el desarrollo y calibración de modelos numéricos tridimensionales para el estudio de detalle de flujo con estructuras, con resultados muy esperanzadores.

En cualquier caso, la evolución de las dos herramientas mencionadas (modelación física y numérica) siguió, inicialmente, caminos paralelos con escasos puntos en común, dando lugar a dos cuerpos de doctrina diferenciados a los que alternativamente se acudía, según el caso. Sin embargo, desde la década de los 80 ó 90 del siglo pasado, dichos caminos de aplicación práctica comenzaron a converger entre sí debido a la reconsideración de un conjunto de conceptos (la física del problema, el campo de aplicación de las leyes de semejanza.)

Y es aquí donde la modelación híbrida tiene su importante papel (véase Fernández Bono, 1992 ó Balairón, 2011), puesto que el desfase entre la naturaleza tridimensional del problema real y la caracterización uni o bidimensional del análisis numérico se puede cubrir, y de hecho ya es una realidad en el campo que nos ocupa, mediante un análisis cíclico interactivo entre la modelación matemática y la modelación física. Así pues, ante un problema hidráulico complejo (como son las interacciones suelo – agua – estructuras, de manera inevitablemente tridimensional y turbulento), la técnica de la modelación matemática en la actualidad dispone de las herramientas suficientes para simular su comportamiento con un grado de aproximación suficiente, si bien sigue siendo incapaz de reproducir los efectos tridimensionales de las condiciones de contorno locales complejas.

En este aspecto, la modelación física, utilizando los resultados parciales de la simulación numérica previa, puede aportar la información que la hidráulica computacional necesita, iniciando un proceso de realimentación cíclica que permite mejorar la calidad de la información obtenida con ambas herramientas y avanzar hacia una solución extrapolable con la máxima fiabilidad al prototipo cuyo funcionamiento se estudia.

Esta modelación híbrida físico matemática en la hidráulica se ve potenciada en los últimos años de manera muy intensa con trabajos de calibración y toma de datos de forma directa y muy intensiva directamente en el prototipo en estudio en la naturaleza, lo que permite calibrar de manera más precisa que hace años, los resultados de los modelos físicos o matemáticos con la realidad simulada. Esto es posible en buena medida gracias al abaratamiento y simplificación de las técnicas de instrumentación, toma de datos y posterior tratamiento y almacenamiento de la información registrada, lo que facilita enormemente el uso de los modelos físicos o numéricos en el campo de la ingeniería del agua, abriendo un camino imparables en el futuro.

Lógicamente, en la medida que avanza la calibración de los modelos numéricos y aumentan las capacidades de cálculo, irá aumentando su campo de aplicación. En cualquier caso la modelación física sigue siendo imprescindible para seguir profundizando en el conocimiento de fenómenos tan complejos como los flujos bifásicos emulsionados (aire-agua) y la física del transporte de sedimentos.

CAPÍTULO 4. MODELOS FÍSICOS.

Un modelo de algo es una imitación simplificada del mismo y del cual se espera que ayude a entenderlo mejor. Un modelo puede ser un aparato, un plan, un diagrama, una ecuación, un programa de computadora o incluso sólo una imagen mental. Si los modelos son físicos, matemáticos o conceptuales, su valor radica en la sugerencia de cómo funcionan o podrían funcionar las cosas.

En ocasiones los fenómenos que se desean estudiar son tan complejos, que no basta analizarlos desde el punto de vista matemático; entonces es necesario hacer uso de técnicas experimentales para obtener soluciones prácticas.

Una de las dificultades que presenta la modelación matemática, es la idealización de los fenómenos, en la cual se realizan simplificaciones importantes; estas sólo pueden ser valoradas por medio de pruebas experimentales aplicadas a modelos físicos de escala reducida (o de tipo analógico).

La aplicación de cualquiera de los dos tipos de modelos, físicos o matemáticos, evidentemente tienen sus limitaciones, mismas que van a depender de la complejidad del problema en la intervención de las variables y sus fronteras a tratar, siendo en algunos casos los modelos matemáticos los más apropiados.

Modelos físicos reducidos

El uso de los modelos físicos a escala reducida, implica que éstos deben ser semejantes al prototipo, para el cual debe satisfacerse las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas, el prototipo A_p y el modelo A_m .

Características:

1. Debe cumplir con similitud geométrica:

La semejanza geométrica implica de modo estricto que se cumpla que la relación entre dimensiones homologas de modelo y prototipo sean iguales. Un modelo y un prototipo son geoméricamente similares si todas las dimensiones del cuerpo en cada una de las direcciones de los ejes coordenados se relacionan mediante la misma escala de longitudes. Lo anterior significa que el modelo y el prototipo son idénticos en forma y únicamente difieren el tamaño. Por lo tanto cualquier longitud del prototipo puede obtenerse multiplicando su longitud homologa en el modelo por un valor fijo que es la escala de líneas (Ilustración IV.1).

$$Le = \frac{L_p}{L_m}$$

Dónde: L_p = longitud de prototipo
 L_e = escala de longitud
 L_m = longitud del modelo

Pudiéndose obtener escalas de áreas y volúmenes cuyos valores fijos son:

$$A_e = L_e^2$$

$$V_e = L_e^3$$

Dónde: A_e = escala de áreas
 V_e = escala de volúmenes

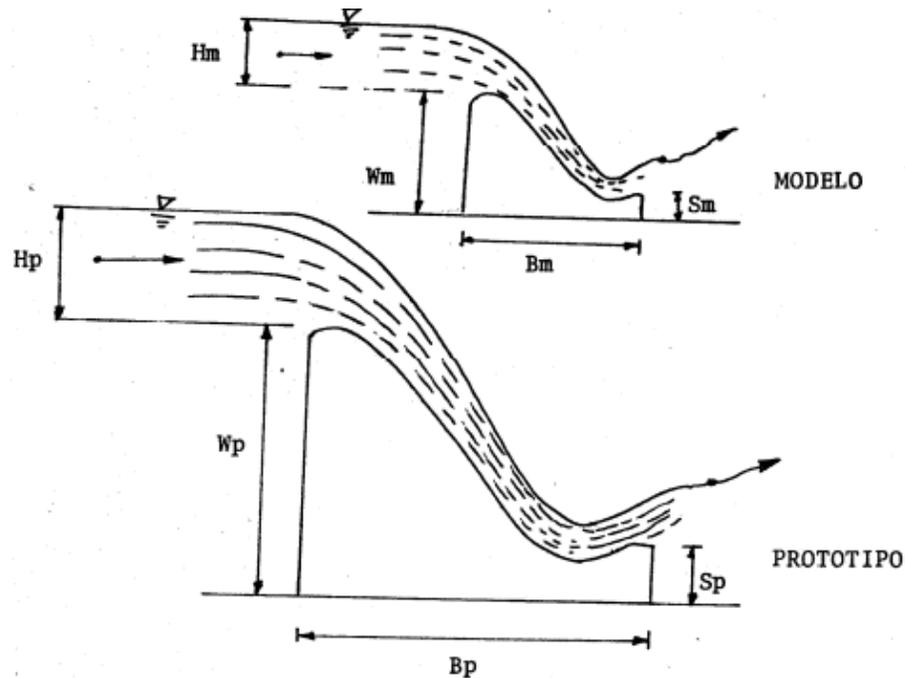


Ilustración IV.1 Ejemplo de un modelo con similitud geométrica.

2. Debe cumplir con similitud cinemática:

Los movimientos en modelo y prototipo tienen similitud cinemática si partículas homologas llegan a puntos homologos en tiempos homologos. Por tanto la similitud cinemática obliga a que modelo y prototipo tengan una escala de líneas y también una escala de tiempos, con ello se logra una escala única de velocidades (Ilustración IV.2).

$$V_e = \frac{V_p}{V_m}$$

$$t_e = \frac{T_p}{T_m}$$

Dónde: V_e = escala de velocidades.
 t_e = escala de tiempos.

El cumplimiento de este tipo de semejanza obliga que haya similitud geométrica., cuando ambas se cumplen, las direcciones del flujo en puntos homólogos del prototipo y modelo son semejantes, es decir, la forma de las líneas de corriente es la misma en modelo y prototipo.

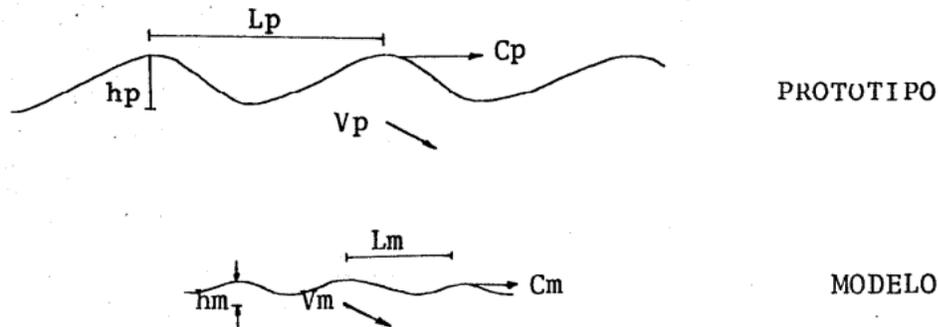


Ilustración IV.2 Ejemplo de un modelo con similitud cinemática.

Puesto que hay una escala de velocidades y de tiempos, se cumple que exista una escala de aceleraciones (a_e) dada por:

$$a_e = \frac{a_p}{a_m} = \frac{V_e}{t_e}$$

Por lo anterior, si se conoce el valor fijo v_e , t_e y a_e , y se miden velocidades, tiempo y aceleraciones en cualquier punto del modelo, se pueden conocer las velocidades tiempo y aceleraciones en puntos homólogos del prototipo, para ello se multiplica la magnitud deseada del modelo por su correspondiente escala.

3. Debe cumplir con similitud dinámica:

Si las fuerzas ejercidas por el fluido en puntos homólogos del modelo y prototipo se relacionan entre si mediante un valor fijo, F_e , (escala de fuerzas), se dice que se cumple la semejanza dinámica. El cumplimiento de esta implica que exista semejanza geométrica y cinemática, por ello algunos autores indican que entre modelo y prototipo existe semejanza cuando cumplan con la semejanza dinámica.

Las fuerzas que actúan sobre una partícula de fluido pueden ser debido a la gravedad, f_g , a la presión, f_p , a la viscosidad f_v y a la tensión superficial f_σ si la suma de esas fuerzas más la inercia f_I no es igual a cero la partícula se acelerara. Se puede demostrar por razones de equilibrio, que la suma de las fuerzas anteriores más la fuerza de inercia es igual a cero (Ilustración IV.3).

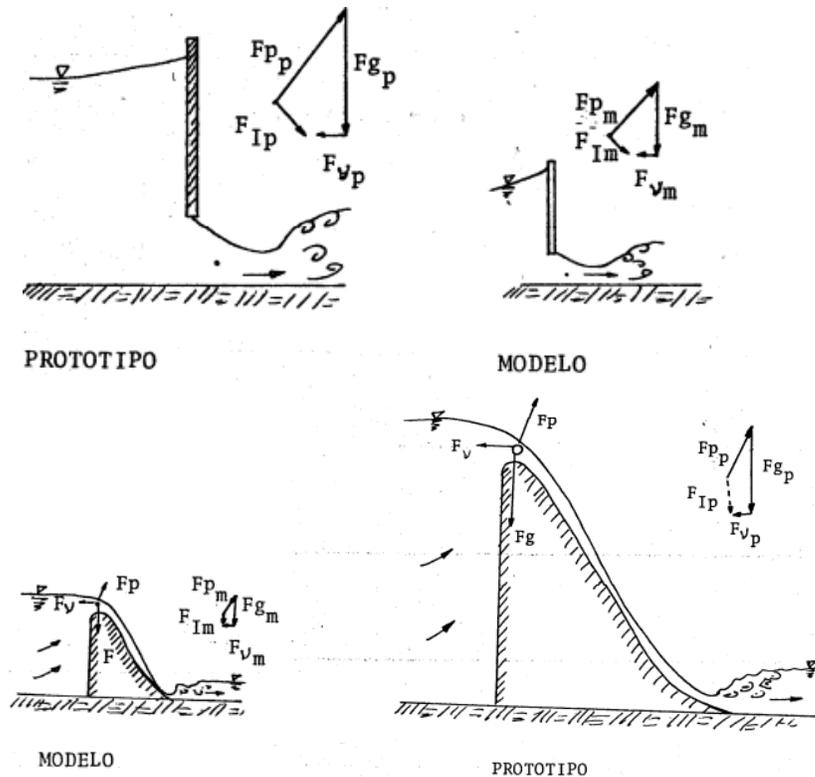


Ilustración IV.3 Ejemplo de modelo con semejanza dinámica.

Esto basado en la teoría de similitud, establecida por Kline:

“Si dos sistemas obedecen al mismo grupo de ecuaciones y condiciones gobernantes, y si los valores de todos los parámetros y las condiciones se hacen idénticas, los dos sistemas deben de exhibir comportamientos similares con tal de que exista una solución única para el grupo de ecuaciones y condiciones”.

Validación del modelo

Validar un modelo es asignar un nivel de certeza adecuada a los resultados del modelo es decir, asegurarse de que contiene todos los parámetros, variables y relaciones funcionales necesarias para que dé respuestas concretas.

Para validar un modelo se utilizan, por lo general, tres pruebas:

1. Se construye el modelo y se analiza para estar seguro de que tiene apariencia de certeza, es decir, que tiene parecido o describe al sistema original.
2. Se efectúa una o más pruebas con el modelo y se pregunta si los resultados parecen razonables.
3. Se busca directamente relacionada o involucrada en el sistema original y se le pide que compare los resultados del modelo con las respuestas actuales del sistema.

CAPITULO 5. Memoria de cálculo de diseño del vertedor de laberinto H=0.4m

Para el cálculo de la altura "P" de la pared de vertedor, se toma el cálculo de recomendaciones de Tullis (2001), donde establece como criterio constructivo un valor mínimo de altura de pared de vertedor de 8 cm, sin relación o especificación de escala alguna utilizada.

Según Falvey el número de ciclos del vertedor de laberinto no es un parámetro de gran importancia. Esto se define dividiendo el ancho del canal entre el ancho del ciclo.

Coefficiente de descarga.

Tullis (1995) utiliza una ecuación de coeficiente de descarga basada en elementos del vertedor y del flujo descargado, y la carga hidráulica (altura H), y por tanto será la utilizada para el desarrollo de esta investigación (V.1).

$$Q = \frac{2}{3} CdL\sqrt{2g}H^{1.5} \quad v.1$$

Fórmula para la determinación del coeficiente de descarga en vertedores de laberinto recomendada por Tullis para $\left(\frac{H}{p}\right) < 0.7$ y $\alpha=90^\circ$ (V.2):

$$Cd = 0.49 + 1.46\left(\frac{H}{p}\right) - 2.56\left(\frac{H}{p}\right)^2 + 1.44\left(\frac{H}{p}\right)^3 \quad v.2$$

Con:

$$L = 2.40m$$

$$P = 0.40m$$

Suponiendo:

$$\frac{H}{p} = 0.5$$

Según la fórmula V.2):

$$Cd = 0.7600$$

$$0.08 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{2}{3}(0.7600)(2.4m)\sqrt{2(9.81 \text{ m/s}^2)}H^{1.5}$$

$$H = 0.0604m$$

Con $H = 0.0604m$

$$\frac{H}{p} = \frac{0.0604}{0.40}$$

$$\frac{H}{p} = 0.1510$$

Según la fórmula V.2):

$$Cd = 0.6570$$

$$0.08 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{2}{3}(0.6570)(2.4m)\sqrt{2(9.81 \text{ m/s}^2)}H^{1.5}$$

$$H = 0.0666m$$

Con $H = 0.0666m$

$$\frac{H}{p} = \frac{0.0666}{0.40}$$

$$\frac{H}{p} = 0.1665$$

Según la fórmula V.2):

$$Cd = 0.6687$$

$$0.08 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{2}{3}(0.6687)(2.4m)\sqrt{2(9.81 \text{ m/s}^2)}H^{1.5}$$

$$H = 0.0658m$$

Con $H = 0.0658m$

$$\frac{H}{p} = \frac{0.0658}{0.40}$$

$$\frac{H}{p} = 0.1645$$

Según la fórmula V.2):

$$Cd = 0.6673$$

$$0.08 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{2}{3} (0.6673)(2.4\text{m}) \sqrt{2(9.81 \text{ m}/\text{s}^2)} H^{1.5}$$

$$H = 0.0659\text{m}$$

Con $H = 0.0659\text{m}$

$$\frac{H}{p} = \frac{0.0659}{0.40}$$

$$\frac{H}{p} = 0.1647$$

Según la fórmula V.2):

$$Cd = 0.6674$$

$$0.08 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{2}{3} (0.6674)(2.4\text{m}) \sqrt{2(9.81 \text{ m}/\text{s}^2)} H^{1.5}$$

$$H = 0.0659\text{m}$$

Con $H = 0.0659\text{m}$

$$\frac{H}{p} = \frac{0.0659}{0.40}$$

$$\frac{H}{p} = 0.1647$$

Según la fórmula V.2):

$$Cd = 0.6674$$

Memoria de cálculo de diseño del vertedor de laberinto H=0.2m

Coefficiente de descarga.

Tullis (1995) utiliza una ecuación de coeficiente de descarga basada en elementos del vertedor y del flujo descargado, y la carga hidráulica (altura H), y por tanto será la utilizada para el desarrollo de esta investigación (V.1).

$$Q = \frac{2}{3} CdL\sqrt{2g}H^{1.5} \quad v.1$$

Fórmula para la determinación del coeficiente de descarga en vertedores de laberinto recomendada por Tullis para $\left(\frac{H}{p}\right) < 0.7$ y $\alpha=90^\circ$

$$Cd = 0.49 + 1.46\left(\frac{H}{p}\right) - 2.56\left(\frac{H}{p}\right)^2 + 1.44\left(\frac{H}{p}\right)^3 \quad v.2$$

Con:

$$L = 2.40m$$

$$P = 0.20m$$

Suponiendo:

$$\frac{H}{p} = 0.5$$

Según la fórmula V.2):

$$Cd = 0.7600$$

$$0.08 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{2}{3}(0.7600)(2.4\text{m})\sqrt{2(9.81 \text{ m}/\text{s}^2)}H^{1.5}$$

$$H = 0.0604\text{m}$$

Con $H = 0.0604\text{m}$

$$\frac{H}{p} = \frac{0.0604}{0.20}$$

$$\frac{H}{p} = 0.3021$$

Según la fórmula V.2):

$$Cd = 0.7371$$

$$0.08 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{2}{3}(0.7371)(2.4\text{m})\sqrt{2(9.81 \text{ m}/\text{s}^2)}H^{1.5}$$

$$H = 0.0617\text{m}$$

Con $H = 0.0617\text{m}$

$$\frac{H}{p} = \frac{0.0617}{0.20}$$

$$\frac{H}{p} = 0.3084$$

Según la fórmula V.2):

$$Cd = 0.7390$$

$$0.08 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{2}{3} (0.7390)(2.4\text{m}) \sqrt{2(9.81 \text{ m}/\text{s}^2)} H^{1.5}$$

$$H = 0.0616\text{m}$$

Con $H = 0.0616\text{m}$

$$\frac{H}{p} = \frac{0.0616}{0.20}$$

$$\frac{H}{p} = 0.3078$$

Según la fórmula V.2):

$$Cd = 0.7388$$

$$0.08 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{2}{3} (0.7388)(2.4\text{m}) \sqrt{2(9.81 \text{ m}/\text{s}^2)} H^{1.5}$$

$$H = 0.0615\text{m}$$

Con $H = 0.0615\text{m}$

$$\frac{H}{p} = \frac{0.0657}{0.20}$$

$$\frac{H}{p} = 0.3075$$

Según la fórmula V.2):

$$Cd = 0.7388$$

CAPITULO 6. Planteamiento del problema

Delgado (2009) hace referencia que en la actualidad muchas de esas estructuras y en especial en las grandes presas construidas alrededor de los años 60 están comenzando el fin de su vida útil. Esta situación ocurre con mayor frecuencia en el sur de EEUU, el Caribe y el sur de Asia; no así en países con sus cuatro estaciones del año bien marcadas, en donde la vida útil de las represas es mayor. A su vez, debido a los cambios climáticos muchas de ellas han visto modificada la mecánica del flujo, por ejemplo, el aumento del volumen de descarga y almacenamiento, en donde se destaca que uno de los problemas más notables es la sedimentación. Para esta última situación, una de las opciones más económicas de rehabilitación, es la modificación de los mecanismos de control de la presa, para mantener el volumen de almacenamiento sin modificar otros elementos de gran escala. Con ello, se generó la necesidad de aumentar la longitud efectiva de descarga en los vertedores de los embalses.

Cordero et al (2007), explica que para tal objetivo se construyen y proyectan los vertedores de laberinto. La particularidad de este tipo de estructuras hidráulicas reside en la forma del vertedor, que es asimilable en vista en planta a un “zig-zag”. Esta especial morfología, incrementa la longitud del vertedor y le permite “encajar” en un determinado espacio disponible, con el fin de aumentar la capacidad de evacuación respecto a la de un vertedor recto convencional ubicado en el mismo espacio y para igual carga hidráulica. En este mismo sentido, Crookston (2010) plantea que la implementación y optimización de un vertedor de laberinto podría tener diferentes variantes, las cuales, de acuerdo a su ubicación y forma, pueden influir en el coeficiente de descarga del vertedor. Algunas de estas configuraciones han sido investigadas en modelos y observaciones a escala de prototipos, y algunas solo se han investigado parcialmente en su desempeño, existiendo otras características que aún no han sido desarrolladas.

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, y en consideración a la necesidad de mejorar y optimizar los caudales vertidos por dichas estructuras, se destaca la importancia de construir un modelo hidráulico genérico a escala. Esto permite realizar estudios que logren definir su eficiencia.

Metodología

El estudio se realizó en el laboratorio de hidráulica del instituto de ingeniería de la UNAM en la ciudad de México. Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo relacionado a la obtención de coeficientes de descarga esto nos permite proveer información para la rehabilitación y diseño de nuevas presas.

Para llevar a cabo esta investigación se construyó en acrílico un modelo de un vertedor de laberinto dotado de seis ciclos, de cresta recta y geometría ortogonal. Este fue instalado en un canal de pruebas hidráulico de flujo de agua a nivel variante, de volumen constante, con sección rectangular de 1.2 m de ancho y 1.3 m de profundidad. El sistema posee un vertedor en “V” que permite conocer los gastos que pasan por el vertedor en estudio.

Posteriormente, las lecturas de carga hidráulica fueron tomadas por un limnómetro de punta, aguas arriba y unos centímetros aguas arriba del vertedor.

Construcción

Se tomó la decisión de construir el modelo en un canal del laboratorio de hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se habilitó el canal de pruebas con un caudal máximo de 80 L/s.



Foto VI.1 Casa de máquinas del laboratorio de hidráulica del IIUNAM.



FotoVI.2 Se comenzó limpiando el sitio de descanso del vertedor de laberinto.



Foto VI.3 Se procedió con la colocación de las bases de la plantilla.

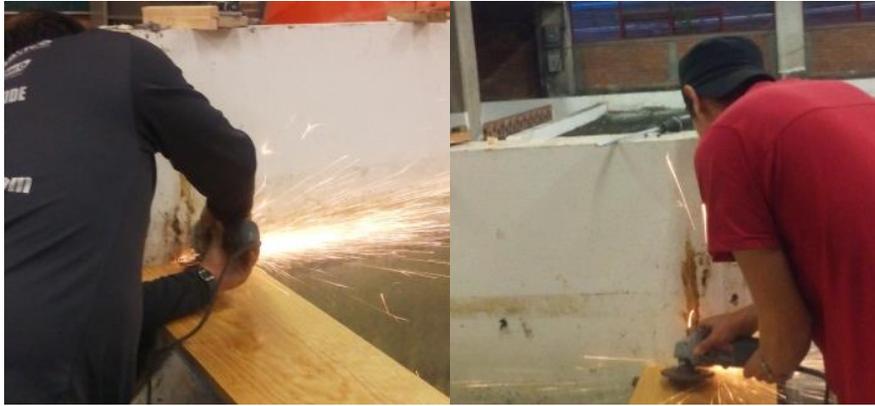


Foto VI.4 Enseguida se colocó la plantilla del vertedor.



Foto VI.5 Se continuó con la colocación de los soportes laterales del vertedor.

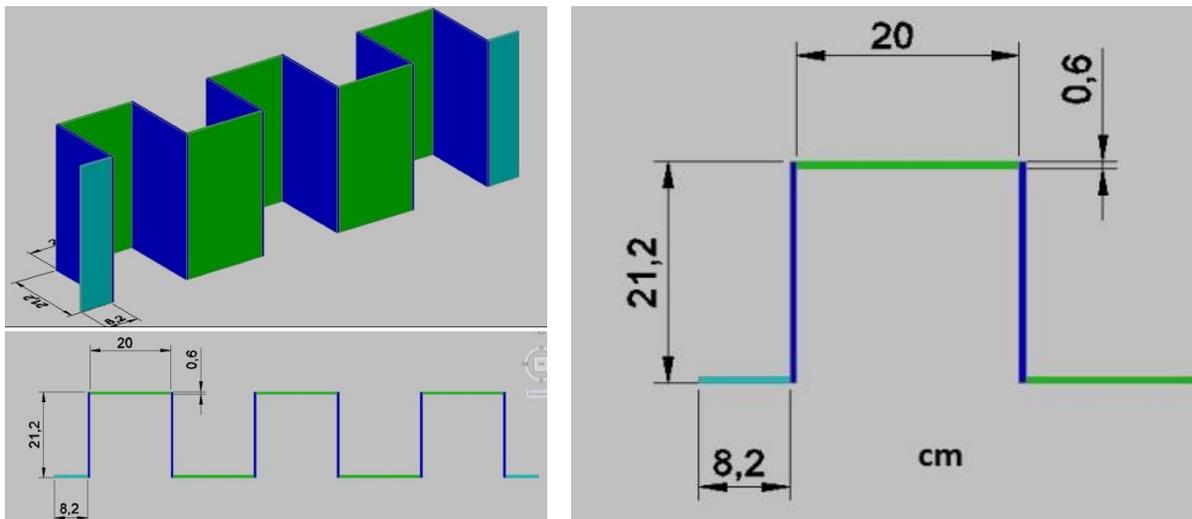


Foto VI.6 Se realizó la modelación del vertedor en acrílico en base de los siguientes planos.



Foto VI.7 Al finalizar el modelo se continuo con la instalación



Foto VI.8 Pruebas preliminares para localizar posibles fugas y sellarlas.



Foto VI.9 Para poder determinar los tirantes se construyó un “puente” móvil en el cual se colocó el limnómetro para poder desplazarlo a todo lo largo de la longitud de la cresta.

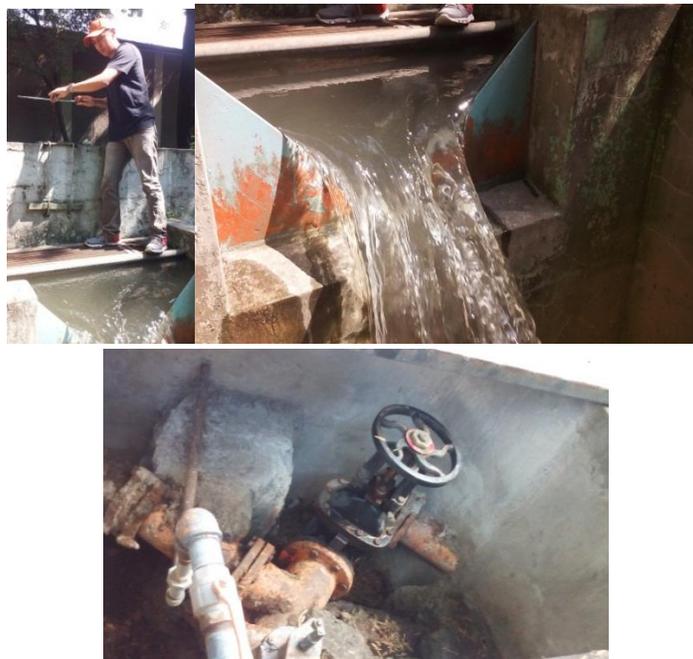


Foto VI.10 El sistema de canales se alimenta de un cárcamo de bombeo pasando por un vertedor triangular, el sistema es administrado con válvulas, permitiendo controlar el caudal suministrado.



Foto VI. 11 Teniendo listo el modelo, el sistema de bombeo y el sistema de medición se comenzó la experimentación.



Foto VI.12 Debido a la altura de diseño y a la fricción en las tuberías que alimentaban el canal de prueba, no se alcanzó un caudal mayor a 29 lt/s; en consecuencia, se decidió crear un diseño de la mitad del tamaño del paramento para poder satisfacer las condiciones y alcanzar un caudal mayor.



Foto VI.13 Se continuó con la experimentación.

El experimento se desarrolló de la siguiente manera:

1. Se midió la altura de la cresta del vertedor de laberinto con ayuda del limnómetro, este dato se tomó como base de las cargas hidráulicas.
2. Se comenzaron a tomar las primeras lecturas una vez que se estabilizó el flujo.
3. Estas mediciones se repitieron aumentando gradualmente el caudal hasta alcanzar el máximo posible.

Capítulo 7. Resultado de los experimentos.

Determinación de coeficientes de descarga.

Vertedor H=0.2m.

Ecuación para vertedor triangular (VII.1).

Fórmula de la Universidad Católica de Chile (VII.2).

$$Q = Ch^{5/2} \text{ VII.1}$$

$$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu K \text{ VII.2}$$

Con $K = 1$ sí $b/h \geq 5$

Con $\theta=90^\circ$

$$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g\mu}$$

Tabla VII.1 Medición de tirantes del modelo.

Nivel de la cresta con respecto al limnómetro =0.0650m			
Registro	Medida del tirante del vertedor de laberinto con respecto el limnómetro (m)	Carga del vertedor triangular CVT (m)	μ
1	0.0355	0.200	0.585
2	0.0255	0.230	0.585
3	0.0150	0.260	0.585
4	0.0025	0.290	0.585

$$C = \frac{8}{15} \sqrt{2(9.81)(0.585)}$$

$$C = 1.3819$$

$$1.- Q = 1.3819(0.200)^{5/2} = 0.0247 \frac{m^3}{s}$$

$$2.- Q = 1.3819(0.230)^{5/2} = 0.0350 \frac{m^3}{s}$$

$$3.- Q = 1.3819(0.260)^{5/2} = 0.0476 \frac{m^3}{s}$$

$$4.- Q = 1.3819(0.290)^{5/2} = 0.0625 \frac{m^3}{s}$$

Ecuación para vertedor de laberinto (VII.3).

$$Q = \frac{2}{3} CdL\sqrt{2g}H^{1.5} \quad \text{VII.3}$$

Donde $H = CVL - NAME$

$$1.- 0.0247 \frac{m^3}{s} = \frac{2}{3} Cd(2.4)\sqrt{2(9.81)}(0.0295)^{1.5} \quad Cd = 0.6881$$

$$2.- 0.0350 \frac{m^3}{s} = \frac{2}{3} Cd(2.4)\sqrt{2(9.81)}(0.0395)^{1.5} \quad Cd = 0.6290$$

$$3.- 0.0476 \frac{m^3}{s} = \frac{2}{3} Cd(2.4)\sqrt{2(9.81)}(0.0500)^{1.5} \quad Cd = 0.6007$$

$$4.- 0.0625 \frac{m^3}{s} = \frac{2}{3} Cd(2.4)\sqrt{2(9.81)}(0.0625)^{1.5} \quad Cd = 0.5644$$

Tabla VII.2 Datos calculados.

vertedor de laberinto paramento de 20 cm			
prueba	Carga (m)	caudal ($\frac{m^3}{s}$)	coeficiente de descarga
1	0.0295	0.02471	0.6881
2	0.0395	0.035	0.629
3	0.05	0.0476	0.6007
4	0.0625	0.0625	0.5644

Grafica VII.1 eficiencia del modelo de 20cm.



Vertedor H=0.4m

Ecuación para vertedor triangular (VII.1).

Formula de la Universidad Católica de Chile (VII.2).

$$Q = Ch^{5/2} \quad \text{VII.1}$$

$$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu K \quad \text{VII.2}$$

Con $K = 1$ sí $b/h \geq 5$

Con $\theta=90^\circ$

$$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \mu$$

Tabla VII.3 Medición de tirantes del modelo.

Nivel de la cresta con respecto al limnómetro =0.1150m			
Registro	Medida del tirante del vertedor de laberinto con respecto el limnómetro (m)	Carga del vertedor triangular CVT (m)	μ
1	0.102	0.142	0.585
2	0.099	0.157	0.585
3	0.095	0.172	0.585
4	0.091	0.198	0.585
5	0.086	0.0215	0.585

$$C = \frac{8}{15} \sqrt{2(9.81)}(0.585)$$

$$C = 1.3819$$

$$1.- Q = 1.3819(0.142)^{5/2} = 0.0105 \frac{m^3}{s}$$

$$412.- Q = 1.3819(0.157)^{5/2} = 0.0135 \frac{m^3}{s}$$

$$3.- Q = 1.3819(0.172)^{5/2} = 0.0169 \frac{m^3}{s}$$

$$4.- Q = 1.3819(0.198)^{5/2} = 0.0241 \frac{m^3}{s}$$

$$5.- Q = 1.3819(0.215)^{5/2} = 0.0296 \frac{m^3}{s}$$

Ecuación para vertedor de laberinto (VII.3).

$$Q = \frac{2}{3} CdL\sqrt{2gH}^{1.5} \text{ VII.3}$$

Donde $H = CVL - NAME$

$$1.- 0.0105 \frac{m^3}{s} = \frac{2}{3} Cd(2.4)\sqrt{2(9.81)}(0.0130)^{1.5} \quad Cd = 0.9995$$

$$2.- 0.0135 \frac{m^3}{s} = \frac{2}{3} Cd(2.4)\sqrt{2(9.81)}(0.0160)^{1.5} \quad Cd = 0.9412$$

$$3.- 0.0169 \frac{m^3}{s} = \frac{2}{3} Cd(2.4)\sqrt{2(9.81)}(0.0200)^{1.5} \quad Cd = 0.8430$$

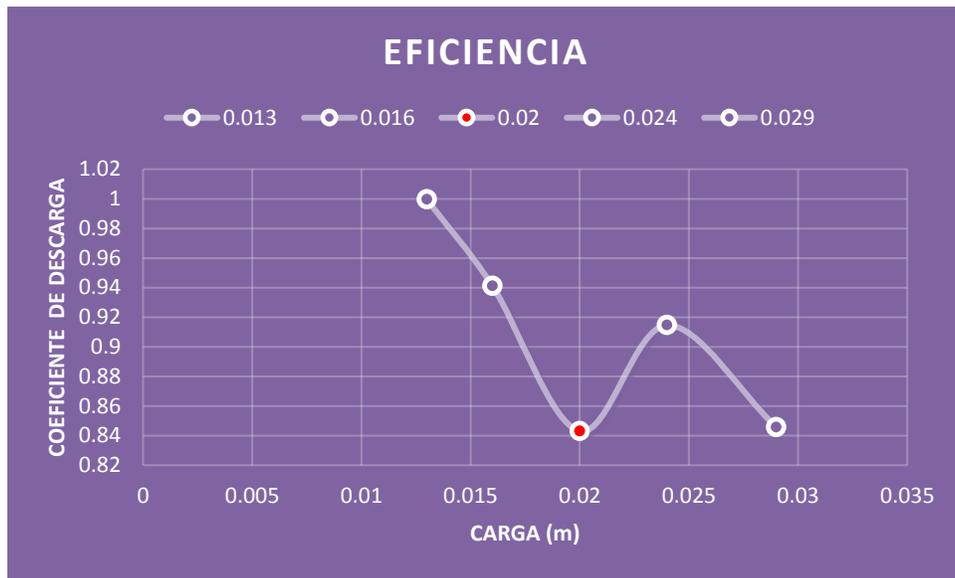
$$4.- 0.0241 \frac{m^3}{s} = \frac{2}{3} Cd(2.4)\sqrt{2(9.81)}(0.0240)^{1.5} \quad Cd = 0.9146$$

$$5.- 0.0296 \frac{m^3}{s} = \frac{2}{3} Cd(2.4)\sqrt{2(9.81)}(0.0290)^{1.5} \quad Cd = 0.8457$$

Tabla VII.4 Datos obtenidos.

vertedor de laberinto paramento de 40cm			
prueba	Carga (m)	caudal ($\frac{m^3}{s}$)	coeficiente de descarga
1	0.013	0.0105	0.9995
2	0.016	0.0135	0.9412
3	0.02	0.0169	0.843
4	0.024	0.0241	0.9146
5	0.029	0.0296	0.8457

Grafica VII.2 eficiencia en modelo de 40 cm.



• La alteración en este punto se debe a la falta de estabilización en el flujo

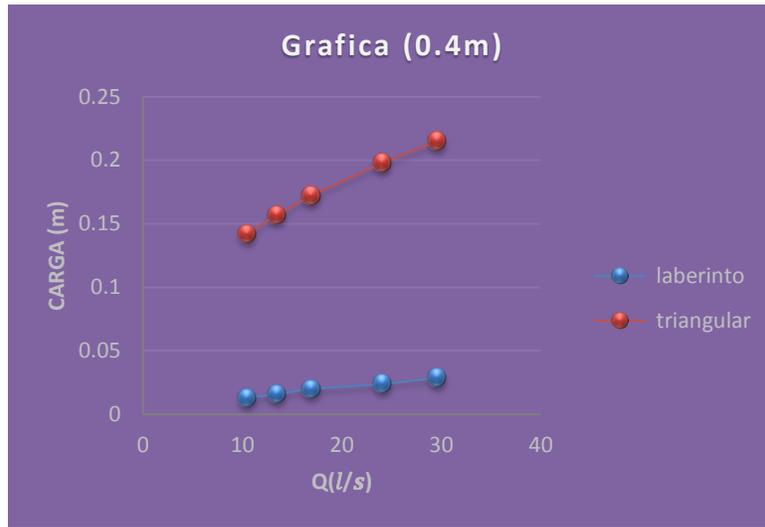
Comportamiento de la carga contra el gasto dependiendo la geometría del vertedor.

Para un vertedor de laberinto (h=0.4m) y un triangular.

Tabla VII.5 Gasto y carga en modelo de 0.4m y triangular.

H(triangular)	$Q \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$Q \left(\frac{l}{s} \right)$	H(laberinto)
0.142	0.0105002	10.5001977	0.013
0.157	0.01349664	13.4966426	0.016
0.172	0.016955	16.9549977	0.02
0.198	0.0241068	24.1068015	0.024
0.215	0.02961916	29.619162	0.029

Grafica VII.3 carga en relación de caudal modelo de 0.4m y vertedor triangular.

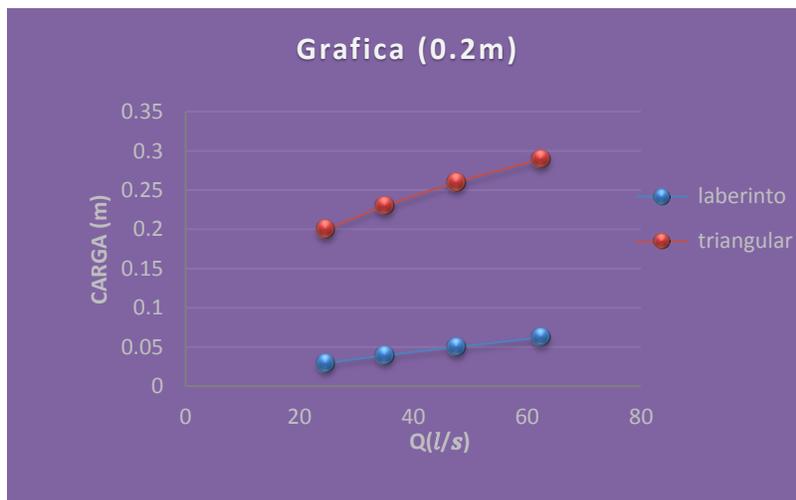


Para un vertedor de laberinto (h=0.20m) y un triangular.

Tabla VII.6 Gasto y carga en modelo de 0.2m y triangular.

H(triangular)	Q ($\frac{m^3}{s}$)	Q ($\frac{l}{s}$)	H(laberinto)
0.2	0.02472018	24.7201787	0.0295
0.23	0.03505873	35.0587322	0.0395
0.26	0.04763323	47.633225	0.05
0.29	0.0625852	62.5851953	0.0625

Grafica VII.4 carga en relación de caudal modelo de 0.2m y vertedor triangular.

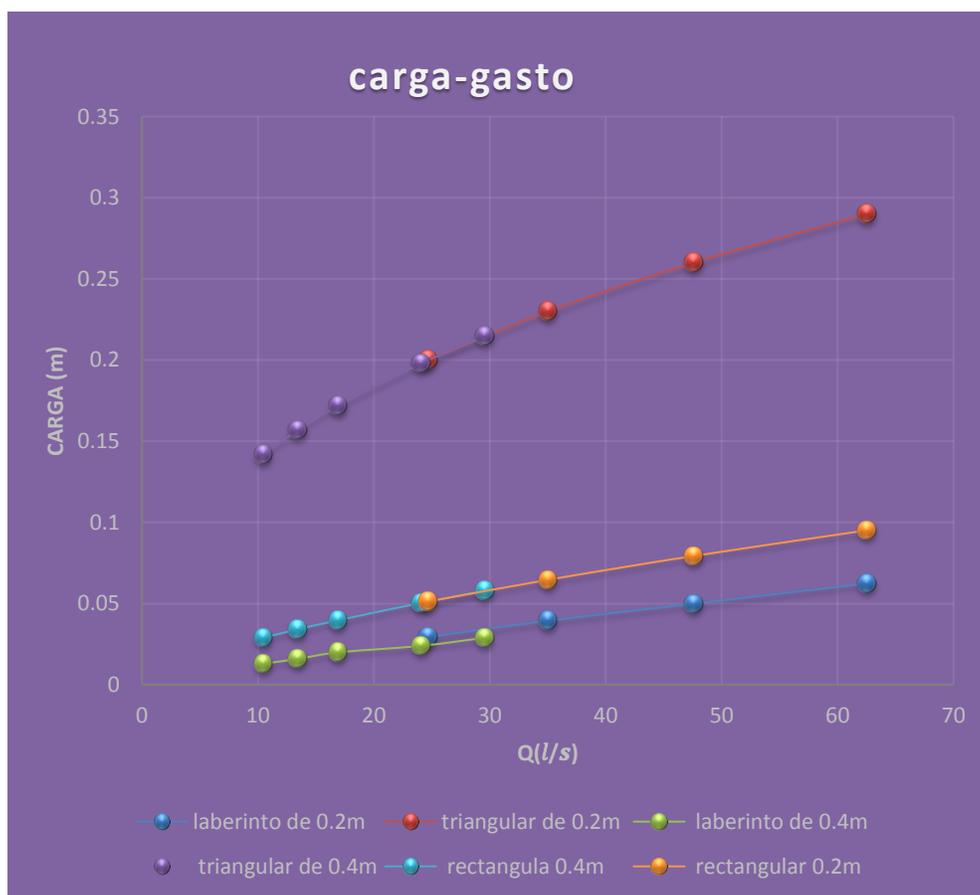


Para un vertedor de laberinto, triangular y rectangular virtual.

Tabla VII.7 carga y caudal de un vertedor rectangular virtual con L=1.2m.

H(rectangular)	Q ($\frac{m^3}{s}$)	Q ($\frac{l}{s}$)
0.029	0.0105002	10.5001977
0.0343	0.01349664	13.4966426
0.0398	0.016955	16.9549977
0.0505	0.0241068	24.1068015
0.0579	0.02961916	29.619162
0.0513	0.02472018	24.7201787
0.0647	0.03505873	35.0587322
0.0794	0.04763323	47.633225
0.0952	0.0625852	62.5851953

Grafica VII.5 comparación del caudal contra la carga de distintos tipos de vertedores.



Conclusión

Debido a la sobrepoblación y a la explosión demográfica, la demanda de energéticos está en aumento; es indispensable ofrecer medidas de abastecimiento eficientes y sostenibles para tener un mejor desarrollo como nación.

Las presas son un elemento clave para lograrlo, por lo tanto, se requiere mejorar su funcionamiento.

Este estudio reforza el hecho de que la implementación de vertedores en laberinto garantiza una mayor eficacia.

Se logró demostrar los diversos beneficios que otorga el implementar estructuras con esta geometría, en el capítulo 3 y 6 se menciona como este tipo de vertedores puede satisfacer un sinnúmero de requerimientos presentados en un proyecto ya que se adapta a diversas topografías y necesidades hídricas, demostrando así su versatilidad.

El modelo desarrollado corrobora lo predicho en la teoría. La experimentación reafirma que un vertedor de laberinto incrementa significativamente los volúmenes descargados, aumentando así su eficiencia, en comparación a otras geometrías, siendo una implementación óptima tanto en proyectos nuevos, como en rehabilitaciones.

En la gráfica final del capítulo 7 se ilustra el comportamiento del caudal respecto al incremento de la carga hidráulica y se observa de manera evidente que el modelo presenta una curva mucho más eficiente en comparación a un vertedor rectangular virtual y un vertedor triangular, si se entiende por eficiencia que el aumento en el caudal, requiere un menor incremento en el tirante (carga hidráulica).

Se ha observado que el funcionamiento más adecuado en estos vertedores se presenta con una lámina vertiente aireada.

Al tener una mayor capacidad de descarga requiriendo un menor espacio se puede implementar en presas con posibilidades limitadas, presas que han alcanzado un cierto volumen de azolve o que por alguna razón (cambio climático) se ha modificado el patrón de precipitación, por lo tanto el escurrimiento, y en consecuencia, el gasto de diseño de la obra de excedencias.

Es una estructura que puede rehabilitar y además optimizar las obras existentes.

Desde el punto de vista monetario puede resultar una opción económica.

Anexo fotografico



Cuarto de máquinas del laboratorio de hidráulica del IIUNAM. Del lado izquierdo la bomba que se utilizó en el experimento.



Canal de llamada del vertedor de laberinto en el IIUNAM.



Vertedor triangular ubicado en la salida del cárcamo principal.



Limpieza del canal experimental en el IIUNAM.



Cauce del vertedor de laberinto ubicado en el laboratorio de hidráulica del IIUNAM.



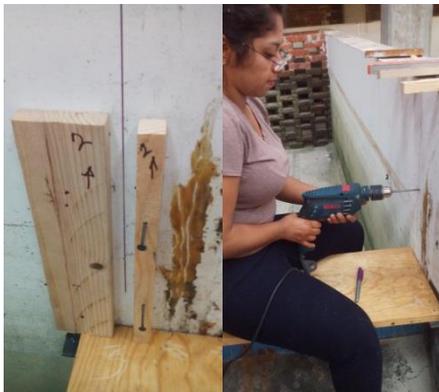
Perforación creación y colocación de ángulos base.



Instalación de la base del vertedor de laberinto.



Instalación de los sujetadores de base para el vertedor de laberinto.



Instalación de los sujetadores de pared.



Acoplamiento del vertedor de laberinto.



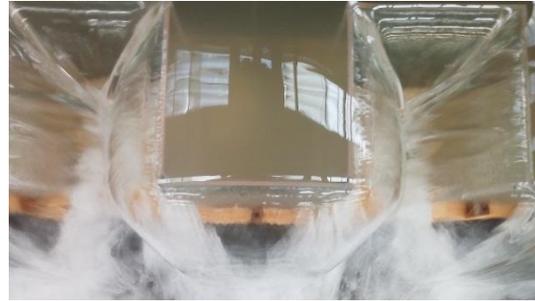
Nivelación del vertedor de laberinto.



Sellado de fugas.



Prueba de verificación de sellado.



Acercamiento del flujo.



Creación de la base para el limnómetro



Ajuste de la altura del vertedor.



Instalación del limnómetro.



Nivelación de paredes ajustadas.



Establecimiento de tirantes.



Pulido de las paredes del vertedor.



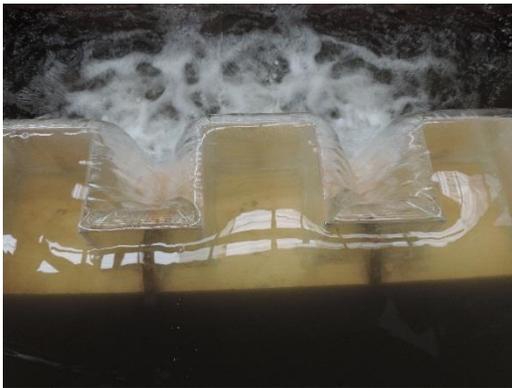
Vista frontal del flujo.



Inundación del almacenamiento.



Vista lateral.



Vista superior del flujo.



Acercamiento a un ciclo.

Bibliografía

- BALAIRÓN PÉREZ, Luis et al. *Avances en investigación aplicada mediante modelación física y numérica en el diseño de estructuras hidráulicas complejas. Ingeniería del agua, [S.l.], v. 18, n. 1, p. 55-69, ago. 2014. ISSN 1886-4996. Disponible en: <<http://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/3143>>. Fecha de acceso: 21 sep. 2016*
- CANIZALEZ CASILLAS, R. (1988). *Apuntes sobre teoría de modelos de obras hidráulicas a superficie libre. LICENCIATURA. UNIVERSIDAD DE SONORA.*
- DESCONOCIDO. (2008). *Centrales Hidroeléctricas*. Septiembre 19, 2016, de La Sociedad Andaluza de Educación Matemática Thales y el Centro de Informática Científica de Andalucía Sitio web: <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo3.html#1>
- DESCONOCIDO. (2008). *Producción de electricidad*. Septiembre 19, 2016, de La Sociedad Andaluza de Educación Matemática Thales y el Centro de Informática Científica de Andalucía Sitio web: <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo2.html>
- DESCONOCIDO. Proyecto 2061. *Science for All Americans*. 21/09/2016, de AAAS Sitio web: <http://www.project2061.org/esp/publications/sfaa/online/chap11.htm>
- ERICES SEPÚLVEDA, F. (2013). *Estudio de la influencia de aproximaciones hidrodinámicas a los ápices de aliviaderos en laberinto, en su coeficiente de descarga*. Licenciatura. Universidad Austral de Chile.
- Figueras Corte, M. (2008). *Diseño de presas pequeña*. maestría. UNAM.
- LÓPEZ MOYA, A. (2013). *“Bases para el diseño hidráulico de la estructura de salida, Canal de recolección y tanque de carga entre $20 M^3/S \geq Q \geq 2m^3/S$ para desarenadores en aprovechamientos hidroeléctricos”*. Licenciatura. Universidad Central Del Ecuador.
- MUCIÑO PORRAS, J. (2013). *Obras hidráulicas*. Licenciatura. Universidad Autónoma de Chiapas.
- SOTELO, G. (1997). *Vertedores*. En *Hidráulica General Vol. 1*(250-254). Balderas 95, México, D.F.: Limusa, S.A. de C.V.
- VARIOS. Facultad de Ingeniería. (2012). *Lineamientos generales para el diseño de una presa*. 2016, de UNAM Sitio web: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/548/A4.pdf?sequence=4>