



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE DISTINTOS TIPOS
DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS A ESCALA EN UN CANAL CON
APLICACIÓN A LA DOCENCIA

EXPERIMENTAL STUDY OF DIFFERENT SCALE HYDRAULIC STRUCTURES
IN AN OPEN CHANNEL WITH APPLICATION TO TEACHING

Realizado por:
Sofía Guerra Elena
Tutorizado por:
José Francisco Velázquez Navarro
Departamento:
Área de Mecánica de Fluidos

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
MÁLAGA, 2023

Resumen:

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo analizar el flujo en un canal hidráulico ante la presencia de diferentes obstáculos. Este estudio experimental se ha llevado a cabo en un canal hidráulico a escala diseñado pensado para su aplicación docente situado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

Los obstáculos se han diseñado a partir de geometrías normalizadas empleadas en aplicaciones reales y luego se han impreso en 3D. En concreto, se han caracterizado un vertedero tipo “*Odgee*”, un vertedero escalonado, un salto tipo “*ski jump*” y un aforador. Este análisis es fundamental en ingeniería para evaluar el rendimiento de estas estructuras en situaciones reales, como el control de inundaciones repentinas y su impacto en las estructuras circundantes. Dentro de esta caracterización se han medido, para diferentes caudales las alturas de la lámina de agua antes y después del obstáculo, la presencia de zonas de aireación y su tamaño, así como los valores de velocidad media y superficial también antes y después del obstáculo. Finalmente, cabe comentar que, como objetivo último, se pretende utilizar estos dispositivos a escala como materiales didácticos para los estudiantes del Máster en Hidráulica Ambiental.

Palabras claves: Flujo en canales abiertos, Resalto hidráulico, Vertedero escalonado, Aforador.

Abstract:

The present Thesis aims to analyze the flow in a hydraulic channel in the presence of different obstacles. This experimental study has been carried out in a scaled hydraulic channel designed for educational purposes, located in the Fluid Mechanics Laboratory.

The obstacles have been designed based on standardized geometries used in real applications and then they had been 3D printed. Specifically, an “*Odgee*” type weir, a stepped weir, a “*skijump*” type jump, and a measuring flume have been characterized. This analysis is essential in engineering to assess the performance of these structures in real-life situations, such as controlling flash floods and their impact on surrounding structures. As part of this characterization, the water surface heights before and after the obstacle, the presence of aeration zones and their size, as well as the values of average and surface velocities, have been measured for different flow rates, both before and after the obstacle. Finally, it should be noted that, as the ultimate goal, these scaled devices are intended to be used as teaching materials for students in the Master’s program in Environmental Hydraulics.

Keywords: Open-channel flow, Hydraulic jump, Multiple Staggered Deflector, Cutthroat Flume.



Índice de contenidos

1. Introducción	1
1.1. Estudio del flujo en canales abiertos	1
1.2. Resalto hidráulico	2
2. Fundamentos teóricos	4
2.1. Número de Froude	4
2.2. La ecuación de Manning	6
3. Materiales y Métodos	9
3.1. Descripción del canal y sus accesorios	9
3.2. Procedimiento de obtención de los datos experimentales	10
4. Diseño de las distintas geometrías	12
4.1. <i>Ski Jump</i>	12
4.1.1. Introducción	12
4.1.2. Aplicación Hidráulica	12
4.1.3. Diseño	13
4.2. <i>Multiple Staggered Deflector</i> o Vertedero Escalonado	15
4.2.1. Introducción	15
4.2.2. Aplicación Hidráulica	15
4.2.3. Diseño	15
4.3. <i>Cutthroat Flume</i> o Aforador sin Garganta	18
4.3.1. Introducción	18
4.3.2. Aplicación Hidráulica	18
4.3.3. Diseño	18
5. Experimentos en el Canal Hidráulico	21
5.1. <i>Broad-Crested Weir</i>	21
5.1.1. Introducción	21
5.1.2. Resultados experimentales	21
5.1.3. Discusión de los Resultados	26
5.2. <i>Ski Jump</i>	27
5.2.1. Introducción	27
5.2.2. Resultados experimentales	27
5.2.3. Discusión de los resultados	31
5.3. <i>Multiple Staggered Deflector</i> o Vertedero Escalonado	32
5.3.1. Introducción	32
5.3.2. Resultados experimentales	32
5.3.3. Resultados experimentales con obstáculo aguas abajo	35
5.3.4. Discusión de los resultados	39



5.4. <i>Cutthroat Flume</i> o Aforador sin garganta	40
5.4.1. Introducción	40
5.4.2. Resultados experimentales	40
5.4.3. Resultados experimentales con obstáculo aguas abajo	44
5.4.4. Discusión de los resultados	46
6. Conclusiones y Líneas futuras de Investigación	47
Bibliografía	49
Apéndice A. Diseños CAD de las diferentes geometrías	51
Apéndice B. Códigos Matlab	55



CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Estudio del flujo en canales abiertos

El estudio del flujo en canales abiertos es de vital importancia debido a su protagonismo dentro de la ingeniería hidráulica y su fundamental papel en los recursos hídricos. Saber como se comporta el agua en canales de diferentes geometrías y materiales de construcción nos permite construir estructuras hidráulicas eficientes y seguras, así como prever futuras situaciones de riesgo, pudiendo resolverlas antes incluso de que ocurran. Otra gran ventaja que nos proporciona dicho estudio es que nos permite optimizar la disponibilidad y la distribución del agua en los sistemas fluviales con el fin de adoptar medidas que fomenten su uso de manera sostenible y la protección del medio ambiente.

En hidráulica, los flujos internos pueden clasificarse en dos categorías principales: flujos en canales abiertos y flujos en conductos cerrados. La diferencia fundamental entre estos dos tipos de flujo radica en la fuerza principal que los impulsa. Los flujos en canales abiertos se caracterizan por tener una superficie libre expuesta a la atmósfera. El agua o el fluido se mueve bajo la influencia de la gravedad. En este caso, la energía cinética del flujo y la energía potencial gravitacional son las principales fuerzas impulsoras. Los flujos en conductos cerrados, se caracterizan por tener las paredes completamente cerradas y no están expuestos a la atmósfera. En este caso, la fuerza principal que impulsa el flujo es la presión ejercida por una fuente externa, como una bomba o un compresor. El flujo en conductos cerrados puede ser tanto a presión positiva (por encima de la presión atmosférica) como a presión negativa (por debajo de la presión atmosférica) [1].

En el trabajo que nos ocupa se procede al estudio del flujo en canales abiertos, el cual es relativamente complicado debido a que la posición de la superficie libre es variable en tiempo y espacio, además de que la profundidad del flujo, el caudal y las pendientes del fondo del mismo y de la superficie libre son interdependientes. Según el cambio en la profundidad del flujo con respecto al tiempo y al espacio [2], el flujo en canales abiertos, en una primera aproximación, puede clasificarse en:

- **Flujo permanente y no permanente:**

Tiene la variable tiempo como criterio. Se considera que el flujo es permanente si su profundidad no cambia o puede suponerse como constante durante el intervalo de tiempo en consideración, mientras que se considera no permanente si dicha profundidad varía con el tiempo. Normalmente, en el estudio de flujo en canales abiertos es válido el estudio del flujo solo bajo condiciones permanentes, si el cambio en la condición del flujo respecto al tiempo no es importante (lo suficientemente pequeño para poder despreciarlo).

- **Flujo uniforme y variado:**

Tiene la variable espacio como criterio. Se considera que el flujo es uniforme si la profundidad del flujo es la misma en cada sección del canal. Del mismo modo, un flujo uniforme puede ser o no permanente según cambie la profundidad con respecto al tiempo.

Concretamente, en nuestro caso, el estudio de flujo en canales abiertos, el flujo es considerado como uniforme permanente ya que la profundidad no cambia durante el intervalo de tiempo en consideración.

1.2. Resalto hidráulico

Como se mencionó anteriormente, el estudio de flujo en canales facilita la construcción de estructuras seguras. Un caso particular que se debe destacar son las presas de baja altura. Este tipo de presas están diseñadas para abarcar todo el ancho de un canal natural, están elaboradas para pasar flujos de entrada desde aguas arriba sobre toda la anchura de la cresta de la presa de manera continua e incontrolada [3]. Las presas más comunes son de forma plana y con cresta [4]. El objetivo de estas presas es conseguir una cantidad de agua confiable aguas arriba para proporcionar “suministro adicional de agua, producir energía hidroeléctrica y desviar agua de riego” para todo tipo de demandas [5]. Estas presas a su vez, provocan un cambio abrupto en la velocidad y altura del flujo, fenómeno conocido como, resalto hidráulico, el cual implica la aparición de turbulencias y cambios en las propiedades del flujo. El salto hidráulico ocurre debido a la conservación de la energía, donde la energía cinética de la corriente de alta velocidad se transforma en energía potencial y se disipa en forma de turbulencia y calor en el flujo de menor velocidad. Su aplicación más importante consiste en disipar la energía del flujo para evitar una erosión brutal sobre un determinado terreno.

Sin embargo, el salto hidráulico, en determinadas condiciones puede provocar una condición muy peligrosa aguas abajo, el salto hidráulico sumergido. El flujo del agua que cae se sumerge debido a que el nivel del agua aguas abajo está alto. Esto crea un tipo de torbellino de agua en la parte de abajo de la presa, y este torbellino empuja el agua hacia arriba en la superficie. Además, hay burbujas de aire atrapadas en esta área. Estas burbujas de aire hacen que el agua no se comporte de la manera normal y hace que sea más difícil que los objetos floten en esta área.



Todo esto hace que este lugar sea muy peligroso. Esta condición hidráulica se conoce comúnmente como “*drowning machine*” o “máquina de ahogamiento”, traducido literalmente al español [6].

Las condiciones de flujo que convierten estas presas en peligros de ahogamiento casi inevitables pueden parecer engañosamente tranquilas. Las presas más altas son evitadas de forma natural al parecer más peligrosas, no obstante las estructuras más pequeñas se presentan de forma inofensiva e incluso llaman la atención de muchos navegantes que acaban probando suerte. Este fenómeno ha ocasionado que navegantes, pescadores y nadadores queden atrapados por el denominado torbellino de la “máquina de ahogamiento”. Al caer, la persona se sumerge y vuelve a aparecer justo aguas abajo de la presa, donde es arrastrada y golpeada por el chorro provocando de nuevo que se sumerja, formando un bucle del cual a la persona le resulta imposible salir y suele acabar en ahogamiento. Según la Base de datos de mortalidad por presas de bajo cabeceo de la Universidad Brigham Young, ha habido más de 450 muertes en los últimos 60 años [7].

Desde que se conoce este hecho numerosas legislaciones, organizaciones e ingenieros, han estado investigando posibles soluciones para disminuir el riesgo de ahogamiento en presas de baja altura [5]. Con todo ello, el objetivo del presente trabajo será estudiar el desempeño hidráulico de diferentes geometrías normalizadas en un canal experimental. Se tiene como objetivo también analizar un caso de referencia en el estudio de flujos en lámina libre, observando el comportamiento de este flujo ante un obstáculo en el lecho del canal y estudiando el fenómeno del salto hidráulico que se forma en diferentes configuraciones geométricas. El propósito es determinar los diversos comportamientos del flujo en relación con cada una de estas geometrías. Se busca identificar en qué geometrías se presenta y es detectable el salto hidráulico, así como en cuáles de ellas también emerge el fenómeno conocido como “máquina de ahogamiento”. Además, se investigará qué geometrías pueden eliminar o interrumpir la condición del salto hidráulico sumergido, evitando así la formación de la “máquina de ahogamiento”. Todo esto se lleva a cabo con el fin de evaluar la viabilidad de utilizar estas geometrías como material docente.



CAPÍTULO 2

Fundamentos teóricos

2.1. Número de Froude

Después de haber abordado de manera general el fenómeno del salto hidráulico, procederemos a explorar los principios teóricos fundamentales que lo sustentan. El salto hidráulico es un fenómeno que surge cuando se produce una transición brusca en el flujo de agua en canales, específicamente cuando un flujo inicialmente subcrítico se encuentra con una sección de aguas más profundas y se transforma en un flujo supercrítico. El número de Froude, que no es más que el cociente adimensional entre las fuerzas de inercia y gravitatorias, divide el flujo en canales en tres estados diferentes según el valor obtenido en la ecuación 2.1.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gY}} \quad (2.1)$$

Donde:

Fr es el número de Froude.

V es la velocidad del flujo.

g es la aceleración debido a la gravedad.

Y es la profundidad hidráulica.

- **Subcrítico:**

Froude menor que 1. Flujo estable y sin turbulencias significativas. Se caracteriza por tener una velocidad del agua menor que la velocidad de la propagación de las ondas de perturbación. Se observa aguas arriba del salto hidráulico sumergido. En este tipo de flujo, las fuerzas de inercia son menores que las fuerzas de gravedad y presión, lo que implica que la presión es dominante en el flujo.

- **Crítico:**

Froude igual a 1. El flujo crítico es un estado de transición entre el flujo subcrítico y el flujo supercrítico. En este régimen, las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad y presión son comparables, lo que resulta en un flujo con características intermedias entre el flujo subcrítico y el flujo supercrítico. El flujo crítico se encuentra justo en la ubicación del salto hidráulico sumergido

- **Supercrítico:**

Froude mayor que 1. El flujo se caracteriza por tener una velocidad del agua mayor a la velocidad de propagación de las ondas de perturbación, lo que puede resultar en la formación de ondas de choque y turbulencias. En el flujo supercrítico, las fuerzas de inercia son dominantes sobre las fuerzas de gravedad y presión, lo que implica que la inercia juega un papel importante en el flujo. El flujo supercrítico se observa aguas abajo del salto hidráulico sumergido.

La transición que se puede observar en las presas de baja altura es un cambio de flujo subcrítico en aguas arriba a crítico según más nos aproximamos a la cresta de la presa para luego dar lugar al flujo supercrítico en la base. Cuando la transición ocurre en la dirección del flujo acelerado toda la energía potencial gravitacional presente aguas arriba se transforma en la energía cinética en la base.

El flujo supercrítico es difícil de mantener aguas abajo, lo cual resulta en la formación de un salto hidráulico para regresar a una condición subcrítica (mayor profundidad). El salto se determina por un aumento abrupto en la altura de la superficie del agua y la circulación inversa del flujo en la superficie. En la superficie el flujo se dirige hacia aguas arriba mientras que la dirección del flujo neto es aguas abajo. Como resultado el impulso total del flujo se mantiene pero una gran cantidad de energía es disipada por las turbulencias que el flujo aguas abajo realiza intentando llenar el espacio vacío por encima de la superficie del flujo supercrítico en la cara de la presa.

El salto hidráulico puede adoptar cuatro formas posibles según la profundidad aguas abajo en relación a la profundidad conjugada (profundidad a la que el salto hidráulico se formaría justo en la base de la presa) [4]:

- **Salto hidráulico arrastrado (*Swept Out Jump*):**

El nivel de aguas abajo es menor que la profundidad conjugada. Cuando esto ocurre el salto hidráulico aparece más tarde. En otras palabras, el salto sobresale o emerge por encima del agua. Este tipo de salto suele ocurrir en canales con pendientes pronunciadas y se caracteriza por tener una zona de caída o catarata en la que el agua cae verticalmente en cascada. (Caso A en la Figura 2.1).

- **Salto hidráulico óptimo (*Conjugated-Depth Jump at Toe*):**

El nivel de aguas abajo coincide con la profundidad conjugada. Cuando esto ocurre el salto hidráulico se produce justo en la base de la presa. En este caso, el salto se encuentra en equilibrio y se caracteriza por tener una transición brusca y vertical entre aguas tranquilas y aguas agitadas. (Caso B en la Figura 2.1).

- **Salto hidráulico sumergido (*Plunging Flow, Submerged Jump*):**

El nivel de aguas abajo es mayor que la profundidad conjugada. Cuando esto ocurre el salto hidráulico sumergirá el flujo en el pie. Este tipo crea una gran zona peligrosa de flujo inverso o contracorriente, dando lugar a la “Máquina de ahogamiento” anteriormente mencionada. En otras palabras, el salto está cubierto o sumergido bajo el agua. Este tipo de salto suele ocurrir en canales con pendientes moderadas y se caracteriza por tener una transición gradual de aguas tranquilas a aguas agitadas en la zona del salto. (Caso C en la Figura 2.1).

■ **Salto hidráulico ahogado (*Surface Jet/ Undular Jump*):**

Ocurre cuando la profundidad aguas abajo es mayor que la profundidad conjugada en una parte del salto y menor en otra parte del salto. Este tipo de salto combina características de los salto hidráulico sumergido y el salto hidráulico refulgente, y su forma puede variar dependiendo de la geometría del canal y las condiciones del flujo. La cola es lo suficientemente alta, el salto hidráulico sumergido se transforma en un salto ondulatorio con el flujo que desborda siguiendo su camino aguas abajo y volteando hacia la superficie de la cola (Caso D en la Figura 2.1).

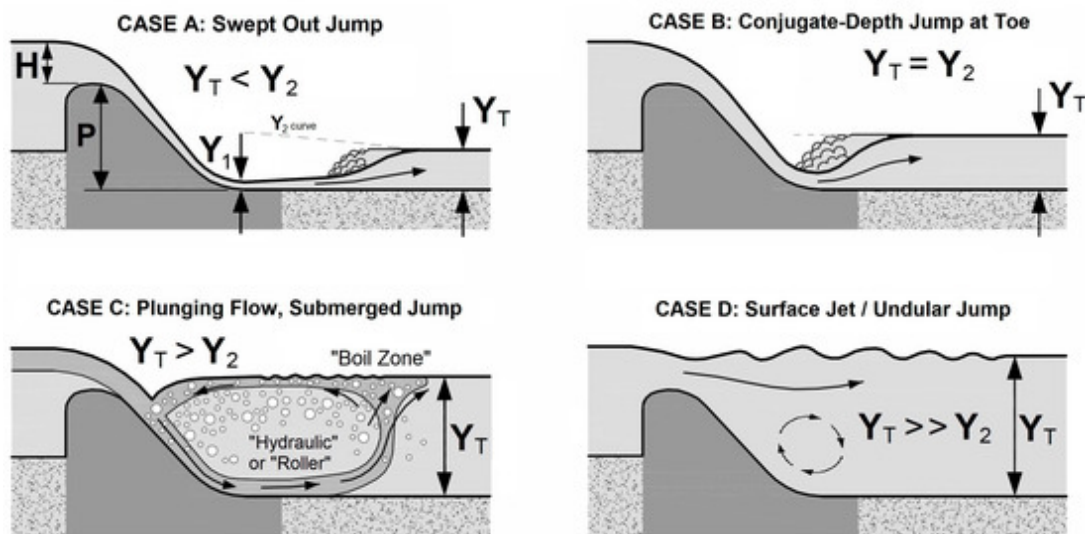


Figura 2.1: Cuatro posibles condiciones de flujo sobre una presa de baja altura: Caso A - salto hidráulico arrastrado; Caso B - salto hidráulico óptimo; Caso C - salto hidráulico sumergido; Caso D - salto hidráulico ahogado (según [8].)

2.2. La ecuación de Manning

La ecuación de Manning es usada para calcular la velocidad del flujo en canales abiertos. La velocidad del flujo en un canal está determinada por la rugosidad de su superficie, la inclinación del canal y la profundidad del agua.

En el experimento, la ecuación de Manning no se empleará en los cálculos, para determinar la velocidad del flujo en las secciones aguas arriba o aguas abajo, ya que esta se empleó inicialmente para acondicionar el canal y obtener las curvas de aforo sin ninguna estructura que afectara el flujo en sí. No obstante, de forma teórica es una acertada simplificación del comportamiento del flujo libre en el canal, aunque no tiene en cuenta factores como la turbulencia, la viscosidad y la presencia de obstáculos en el canal. Su expresión matemática se define como:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (2.2)$$

Donde:

Q es el caudal o volumen de agua que fluye en el canal en un período de tiempo determinado.

n es el coeficiente de rugosidad de Manning, que es una medida de la rugosidad de la superficie del canal y se expresa en unidades de velocidad.

A es el área transversal del flujo en el canal.

R es el radio hidráulico del canal, que es el cociente entre el área transversal y el perímetro mojado del canal.

S es la pendiente del canal, que se expresa en unidades de longitud por unidad de longitud.

El coeficiente de rugosidad de Manning puede variar dependiendo de la superficie del canal por lo que existen tablas específicas en las que se ha normalizado su valor según la relación entre estos dos parámetros. En la Figura 2.2 se puede observar una lista de los valores estandarizados mencionados anteriormente según [9]

Material	n
<i>Metals</i>	
Steel	0.012
Cast iron	0.013
Corrugated metal	0.025
<i>Non-metals</i>	
Lucite	0.009
Glass	0.010
Cement	0.011
Concrete	0.013
Wood	0.012
Clay	0.013
Brickwork	0.013
Gunite	0.019
Masonry	0.025
Rock cuts	0.035
<i>Natural streams</i>	
Clean and straight	0.030
Bottom: gravel, cobbles and boulders	0.040
Bottom: cobbles with large boulders	0.050

Figura 2.2: Valores típicos del coeficiente de rugosidad tomado de [9].

El radio hidráulico es uno de los parámetros mas importantes en la fórmula de Manning ya que influye en la resistencia que presenta el flujo debido a la fricción con las paredes del canal. Cuanto mayor sea el radio hidráulico mayor sera la velocidad del agua y menor la resistencia al flujo. El radio hidráulico a su vez se expresa como:

$$Rh = \frac{A}{P} \quad (2.3)$$

Donde:

Rh es el radio hidráulico.

A es el área transversal del canal.

P es el perímetro mojado del canal.



El perímetro mojado se define como la longitud de la línea de contacto entre el agua y las paredes del canal y su expresión matemática por lo tanto depende de la forma geométrica de la sección transversal del mismo. En el caso de nuestro experimento, el canal que nos ocupa es uno rectangular por lo que el perímetro mojado se expresa como:

$$P = b + 2h \quad (2.4)$$

Donde:

P es el perímetro mojado.

b es el ancho del canal.

h es la profundidad del agua en el canal.

Del mismo modo para nuestro caso, el área transversal del canal se expresaría como:

$$A = bh \quad (2.5)$$

Donde:

A es el área transversal del canal.

b es el ancho del canal.

h es la profundidad del agua en el canal.

Las ecuaciones 2.5 y 2.4 expresadas anteriormente, serán útiles en los siguientes capítulos, ya que, una vez que realicemos los experimentos, nos ayudarán a obtener y calcular los valores buscados.

CAPÍTULO 3

Materiales y Métodos

3.1. Descripción del canal y sus accesorios

El canal de ensayo disponible en el laboratorio de Mecánica de fluidos tiene una zona de medición acristalada de 2 metros con una sección transversal de flujo de 64 centímetros de anchura y 30 centímetros de altura. Canal por el que se hace circular agua, de sección rectangular, con paredes transparentes que permiten la observación de todos los ensayos.

El agua es tomada del depósito de almacenamiento mediante una bomba hidráulica y, por medio de la tubería, es conducida al depósito de entrada. Desde ahí, el agua llega al canal a través de una entrada con disipación de energía. Al llegar al extremo del canal, el agua retorna al depósito impulsada por la gravedad. Para regular el caudal que circula por el canal se dispone de una válvula a la salida de la bomba. El valor teórico del caudal se introduce manualmente y es regulado gracias a un caudilímetro de tipo rotámetro para montaje en posición vertical. El canal está montado sobre dos soportes, con un sistema que permite controlar la inclinación del canal.

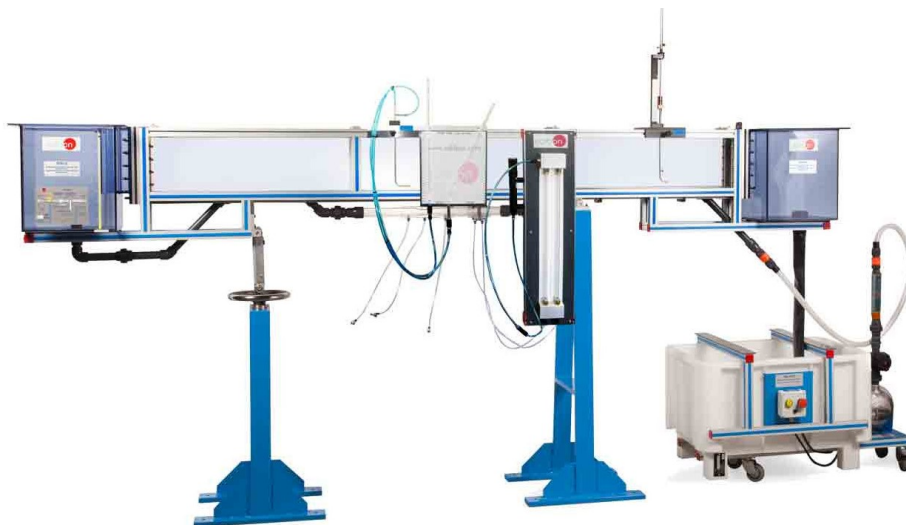


Figura 3.1: Canal experimental laboratorio de Mecánica de Fluidos.

3.2. Procedimiento de obtención de los datos experimentales

A continuación, se describe el procedimiento experimental que se siguió en el análisis de los experimentos llevados a cabo en el canal hidráulico. El objetivo consiste en evaluar los resultados obtenidos y comprender el comportamiento del flujo ante diversos obstáculos. Con este propósito, se recopilarán parámetros específicos con cada obstáculo, los cuales deben tomarse en consideración. Por ejemplo, si se presenta el fenómeno del salto hidráulico sumergido, también se registrará y medirá su magnitud. Con el fin de lograr dicho propósito, se ha planificado la ejecución del experimento para distintos valores de caudal.

Para cada valor de caudal, se tomarán medidas específicas. En primer lugar, se registrarán las alturas del flujo de agua en las zonas aguas arriba ($H1$), de descarga ($H2$) y aguas abajo ($H3$). Con el propósito de obtener medidas más precisas y confiables, se capturaron fotografías de todos los experimentos. Estas fotografías han sido analizadas utilizando la herramienta “imtool” del software Matlab, junto con una fotografía inicial del experimento con una regla graduada. De esta manera, se establecerá una correspondencia entre centímetros y píxeles para obtener valores precisos de las distintas alturas. Esto garantizará la exactitud en las mediciones realizadas.

Posteriormente, se calcularán tanto la velocidad media como la velocidad superficial “aguas arriba” y “aguas abajo” para cada uno de los experimentos. Así, la velocidad media se expresa como:

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} \quad (3.1)$$

Donde:

\bar{v} representa la velocidad media.

Q es el caudal, que es la cantidad de fluido que pasa por una sección en un intervalo de tiempo determinado.

A es el área transversal.

Por lo tanto, conociendo el valor del caudal, el cual se regula de forma manual y del área transversal del flujo, la cual conocemos gracias a la ecuación 2.5 podemos aplicar la ecuación 3.1 para conocer los valores de la velocidad media en cada uno de los diferentes experimentos futuros.



De otro modo, los cálculos de las velocidades superficiales se han realizado con la ayuda del software Matlab. Para ello, en cada uno de los diferentes valores de caudal para los diversos experimentos, se grabó un vídeo en el que se puede observar una estructura atravesando el canal hidráulico. Luego, se utilizó el software Matlab para descomponer cada vídeo en imágenes individuales, conocidas como frames. A continuación, se calculó la velocidad superficial “aguas arriba” y “aguas abajo” utilizando el tiempo que el objeto tardó en recorrer una distancia específica antes y después del obstáculo, respectivamente. Para una mejor comprensión de los cálculos realizados para la obtención de las velocidades superficiales se recomienda ver los códigos Matlab utilizados, consultar el Apéndice B.

Finalmente, empleando el mismo programa, se ha generado una imagen que representa el promedio de todos los frames para cada uno de los experimentos. El propósito de esta imagen es mejorar la visualización del comportamiento del flujo de agua ante los distintos obstáculos. En cada experimento, se adjuntará la imagen promedio más representativa para ofrecer una mejor comprensión del fenómeno.

En todos los experimentos, se seguirá el procedimiento experimental, ya descrito. La única variación será el tipo de obstáculo que utilizaremos. A pesar de esta diferencia, mantendremos una metodología consistente y rigurosa en todos los casos.

CAPÍTULO 4

Diseño de las distintas geometrías

En este capítulo se procede al diseño de las diferentes geometrías cuya forma y dimensiones se encuentran normalizadas y que, posteriormente, se imprimirán en 3D. Dichas geometrías serán utilizadas como obstáculos en nuestro experimento hidráulico.

4.1. *Ski Jump*

4.1.1. Introducción

La primera geometría que se ha diseñado para su uso en el posterior experimento hidráulico es la denominada como *Ski Jump* o “salto de esquí”, al ser una estructura idónea para disipar la energía del agua de forma efectiva y económica. La forma de la rampa permite que el agua caiga de manera suave y controlada, minimizando la formación de ola de choque en el flujo aguas abajo. Además, la longitud y pendiente de la rampa se pueden ajustar adecuadamente para asegurar que el flujo de agua se mantenga estable y no genere ningún tipo de salto hidráulico. Sin embargo, la documentación existente respecto al diseño y dimensionamiento de las estructuras para garantizar la integridad estructural ante el paso de grandes caudales de agua es limitada. El resalto final o *flip bucket* es un componente importante de los disipadores de energía de este tipo y su función principal es desviar el flujo de alta velocidad y disipar la energía.

4.1.2. Aplicación Hidráulica

La forma característica de la presa *Ski Jump* consiste en una rampa empinada que se curva hacia arriba en la cresta de la presa, formando una especie de *Ski Jump* o trampolín. Esta forma permite que el flujo de agua se eleve en la rampa y se desvíe hacia arriba y hacia afuera en lugar de caer verticalmente en la base de la presa. Esto ayuda a reducir la energía y velocidad del flujo, evitando o mitigando el salto hidráulico. Además de evitar el salto hidráulico, la forma de la presa *Ski Jump* también puede contribuir a la estabilidad de la presa, ya que la rampa empinada ayuda a disipar la energía del flujo de agua y reduce la erosión aguas abajo de la cresta de la presa. [9]

4.1.3. Diseño

Para proceder a su diseño se requiere conocer varios parámetros, como el radio, la altura mínima y el ángulo de trayectoria del impulso. Todos estos parámetros están estrechamente relacionados y pueden requerir ajustes mediante un proceso de prueba y error para lograr un correcto diseño.

De este modo según [9] la ecuación que describe el perfil del obstáculo sería:

$$X_H = k_H s_{in}^2 + 2k_{cos} \alpha_1 [H_S (H_S s_{in}^2 + Y)]^{1/2} \quad (4.1)$$

Donde:

X_H es la distancia horizontal de lanzamiento desde el borde del cucharón hasta el punto de impacto con el agua de cola, en metros.

Y es la diferencia de elevación entre el borde del cucharón y el agua de cola, en metros.

H_S es la cabeza de velocidad del chorro en el borde del cucharón, en metros.

α_1 es el ángulo del borde del cucharón respecto a la horizontal, en grados.

k es la resistencia del aire.

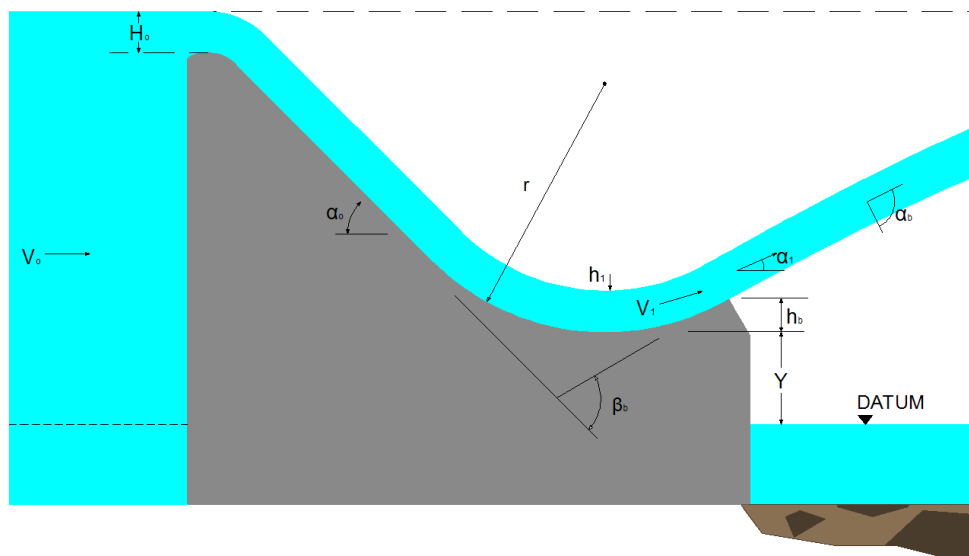


Figura 4.1: Trayectoria de los parámetros del dissipador de energía *Ski Jump*, según [9].

Mientras que para calcular la zona del resalto, en concreto el ángulo del impulso se ha empleado la ecuación (4.2) utilizando el valor de Froude según la ecuación (2.1).

$$\tan \alpha = \frac{1}{3} F_o \quad (4.2)$$

Donde:

α representa el ángulo del resalto final o *flip bucket*.

F_o es el número de Froude.

Cabe destacar que para hacer uso de la ecuación (2.1) se necesita conocer el valor de la velocidad media y profundidad hidráulica. Para ello, en un primer lugar el experimento se llevo a cabo sin contar con la geometría *Ski Jump* o cualquier otro obstáculo, dejando circular simplemente el flujo de agua a través del canal hidráulico experimental. Los valores obtenidos se observan en la tabla 4.1

Q (l/h)	Q (l/s)	Profundidad hidráulica (cm)	Distancia recorrida (cm)	t_{medio} (s)	V_{media} (cm/s)	Froude
3000	0,8333	3,4	41,35	1,1433	36,16	0,6

Tabla 4.1: Valores obtenidos en el experimento sin obstáculo, necesarios para calcular el Froude.

Por lo tanto, tras emplear la ecuación (4.2) , se ha calculado el ángulo de la trayectoria de impulso como parámetro principal. El ángulo del impulso que se ha obtenido es de 28° .

Respecto al resto de coeficientes, se han estimado unos valores arbitrarios, con la idea de tener una “plantilla” de la curva que da lugar al obstáculo para poder dibujarlo en 3D. Utilizando el ángulo de impulso calculado y las relaciones establecidas en [9] con los demás parámetros relevantes, se han obtenido todas las dimensiones necesarias para nuestro diseño. Luego escalaremos la forma resultante a nuestras necesidades. Así, se logra justificar plenamente el diseño en cuestión.

Finalmente en el Apéndice A se aprecia el modelo final del *Ski Jump* con las acotaciones oportunas en milímetros. Podemos ver como las medidas se ajustan a las del canal en el laboratorio, donde lo pondremos a prueba. De acuerdo con las expectativas, el modelo exhibe una curvatura descendente suave y constante, culminando con el cese del impulso en el último resalto.

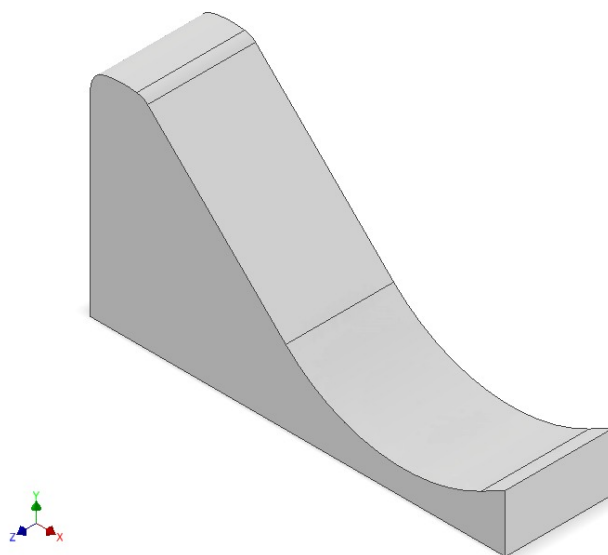


Figura 4.2: Diseño CAD *Ski Jump*.

4.2. *Multiple Staggered Deflector* o Vertedero Escalonado

4.2.1. Introducción

La segunda geometría escogida se define como una modificación del vertedero conocido coloquialmente como “*flip lip*”. Esta iniciativa fue explorada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) y demostró grandes avances en eliminar el salto hidráulico sumergido. Su diseño, básicamente era la instalación de un deflector horizontal rectangular en el vertedero de una presa, con una plataforma especificada paralela a la superficie aguas abajo, y una elevación correspondiente [6].

En nuestro experimento, dicha modificación consiste en utilizar una serie de deflectores en lugar de un único deflector en la superficie del vertedero.

4.2.2. Aplicación Hidráulica

Teóricamente, esta modificación evitará la formación de saltos hidráulicos sumergidos y permitirá el paso seguro aguas abajo de cualquier navegante que atraviese el vertedero. Los deflectores, conocidos comúnmente como escalones, en sí mismos son relativamente seguros, ya que una persona que pase por encima del vertedero modificado será desviada aguas abajo sin sufrir lesiones graves. Una vez que hayamos realizado el experimento, podremos determinar si cumple con su función teórica. El costo de agregar estos escalones a un vertedero sería relativamente bajo, ya que no requiere renovaciones extensas en la represa, como la ampliación de la longitud del vertedero.

4.2.3. Diseño

La forma de una presa con deflectores generalmente consiste en una serie de rampas empinadas, escalones o bloques colocados en la superficie de la presa, que se disponen de manera transversal al flujo de agua. Estos deflectores pueden tener diferentes formas y tamaños, dependiendo del diseño y los objetivos específicos del proyecto.

Para la elaboración de su diseño se ha seguido el procedimiento de diseño básico según [6], donde se especifica que los deflectores deben reducirse a un porcentaje de la altura completa de la presa y se colocaran escalonadamente a lo largo del eje Z de la presa con el fin de maximizar cada ancho del deflector siendo cada uno de ellos plenamente funcionales. En primer lugar, se ha calculado el largo de cada deflector empleando la ecuación (4.3).

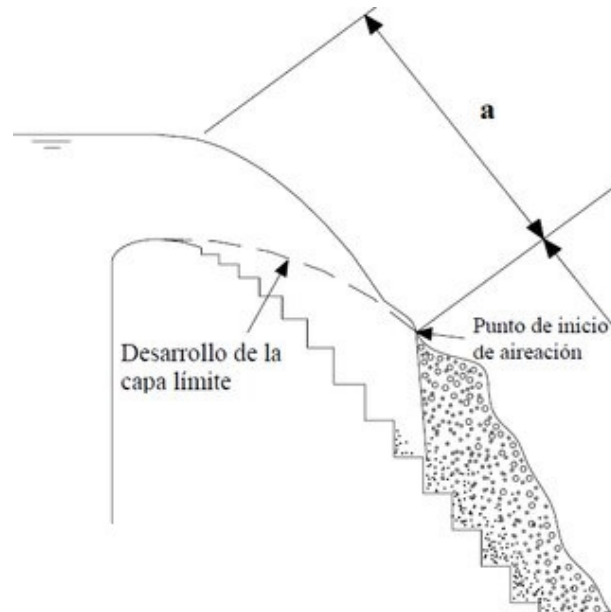


Figura 4.3: Geometría básica del *Multiple Staggered Deflector*, según [10].

$$w = \frac{B}{j} \quad (4.3)$$

Donde:

w representa el largo del deflector.

B se refiere al largo de la presa.

j representa el número de columnas.

En nuestro experimento el número de columnas escogidas ha sido 12 y por lo tanto se tendrán también 12 escalones, además el largo de la presa ha sido seleccionado como 180 milímetros para ajustarse a nuestro canal experimental. Como resultado, el largo de cada deflector es de 15 milímetros. Cabe destacar que todas las columnas de deflectores tienen la misma longitud y marcan el escalonamiento de los deflectores a lo largo del eje Y. Por lo tanto, nuestro estudio cuenta con 12 escalones de igual largo.

Respecto al alto de los deflectores, se ha seguido la ecuación (4.4):

$$h = \frac{H}{j} \quad (4.4)$$

Donde:

h representa el alto del deflector.

H se refiere a la altura de la presa.

j representa el número de columnas.

En nuestro ensayo, la altura de la presa se ha fijado como 100,526 milímetros tomando como referencia el vertedero *flip lip* original, pero escalado, para que fuese viable en nuestro canal experimental. Además, en este caso el número de columnas y por tanto el de escalones sería uno menos ya que el último escalón tiene una altura mayor. Este suele ser más alto y recto para minimizar la aparición de zonas aireadas al final, lo que podría generar problemas de erosión en la solera del canal.

Tras superar la cresta hay un descenso leve y suave y, justo después, ya aparece el primer escalón. Esto es así en este caso para ayudar a que la lámina de agua se ajuste mejor a la forma del obstáculo. Como resultado, el alto de cada deflector es de 9,139 milímetros, exceptuando el último y el primero, que tienen una longitud mayor y menor, respectivamente. Se recomienda ver el Apéndice A donde se aprecia el modelo final del *Multiple Staggered Deflector* con las acotaciones oportunas en milímetros.

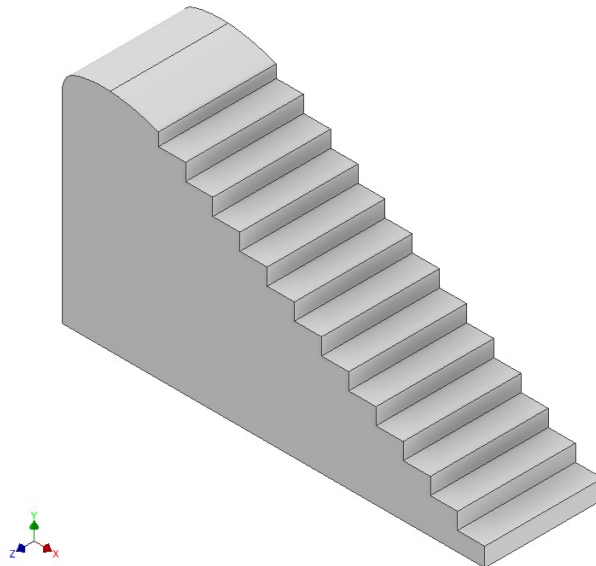


Figura 4.4: Diseño CAD Vertedero Escalonado.

4.3. *Cutthroat Flume* o Aforador sin Garganta

4.3.1. Introducción

En la segunda mitad del siglo XX, se llevaron a cabo una serie de investigaciones con el propósito de desarrollar un nuevo dispositivo de medición de caudal que superara las limitaciones del canal *Parshall* en aplicaciones con una superficie plana constante. El fruto de estas investigaciones fue el aforador *Cutthroat*, también conocido como aforador sin garganta. Inicialmente diseñado para medir el flujo en sistemas de riego, este dispositivo ha evolucionado para abarcar una amplia variedad de aplicaciones. Actualmente, se utiliza en diversos contextos, como la descarga de agua de enfriamiento, la filtración en presas, el tratamiento de aguas residuales y la gestión de aguas pluviales, entre otros [11].

La versatilidad del aforador *Cutthroat* lo ha convertido en una herramienta indispensable en el campo de la ingeniería hidráulica y por lo tanto, ha sido la última geometría escogida para su posterior prueba experimental en el canal.

4.3.2. Aplicación Hidráulica

El *Cutthroat Flume* desempeña su función como un dispositivo para medir el caudal al restringir el flujo de agua que atraviesa el canal. Esta restricción se logra mediante la contracción de las paredes laterales del canal, mientras se mantiene constante la elevación del suelo. De este modo, se logra aumentar la velocidad del flujo de agua, el cual inicialmente se encuentra en un estado lento y subcrítico, hasta alcanzar un estado supercrítico.

4.3.3. Diseño

El aforador sin garganta (*Cutthroat flume*) presenta una geometría simple; base plana horizontal, dos paredes laterales verticales convergentes con una convergencia de 3:1 que conforman la sección de entrada y dos paredes también verticales pero divergentes con una divergencia de 6:1. La unión de ambas secciones da lugar a la denominada garganta del aforador [12].

Tanto la sección de entrada como la sección de salida tienen igual amplitud expresada por la letra B y cuyo valor se obtiene en la ecuación (4.5):

$$B = W + \left(\frac{L}{4,5} \right) \quad (4.5)$$

Donde:

B representa la amplitud del canal.

W se refiere a la garganta.

L representa la longitud del aforador.

La descarga en el aforador se calcula a través de las profundidades del flujo agua arriba, h_a , y aguas abajo, h_b , de la garganta. Para poder conocer con exactitud dichas profundidades el aforador debe contar con dos pozos tranquilizadores. Estos pozos deben estar colocados a cada lado de la estructura y comunicados con ella en un punto bien definido, a una distancia L_a y L_b , aguas arriba y aguas abajo de la garganta respectivamente. Las longitudes L_a y L_b se pueden calcular por medio de las siguientes ecuaciones:

$$L_a = \frac{2L}{9} \quad (4.6)$$

$$L_b = \frac{5L}{9} \quad (4.7)$$

En la figura 4.5 se muestra un diagrama del aforador sin garganta con sus dimensiones básicas según [13].

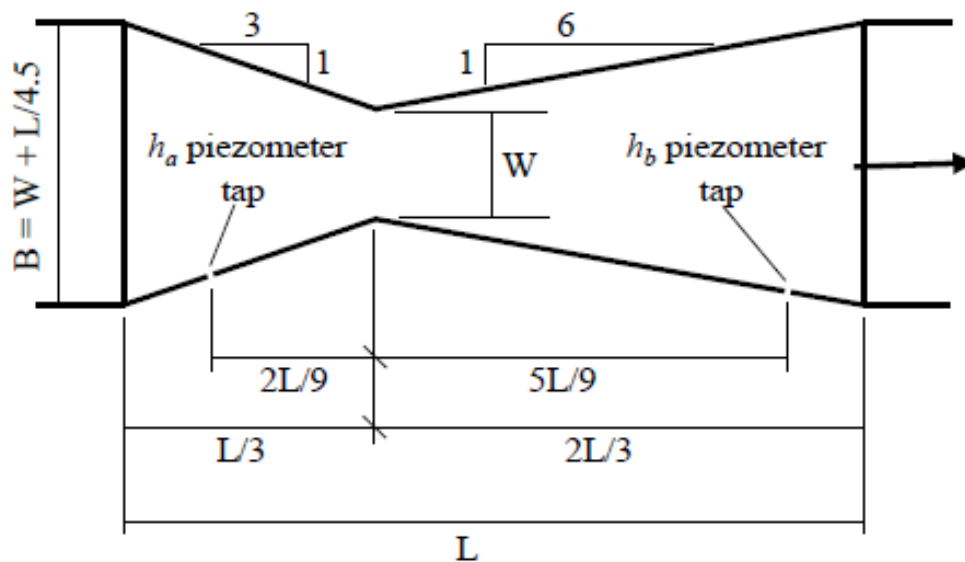


Figura 4.5: Geometría plana *Cutthroat Flume*, según [13].

En nuestro experimento, tanto la amplitud del canal como la longitud del aforador son conocidos, 64 milímetros y 150 milímetros respectivamente. Por lo tanto, gracias a la ecuación (4.5) podemos conocer el valor de la garganta. Aplicando los conceptos de trigonometría básicos junto con las relaciones de convergencia y divergencia posteriormente expresadas también se conoce el valor de los ángulos de las paredes verticales aguas arriba y abajo respectivamente. De esta forma todos los parámetros geométricos de la figura 4.5 se encuentran perfectamente definidos y en consecuencia se puede proceder a su diseño. Se recomienda ver el Apéndice A donde se aprecia el modelo final del *Cutthroat Flume* con las acotaciones oportunas en milímetros.

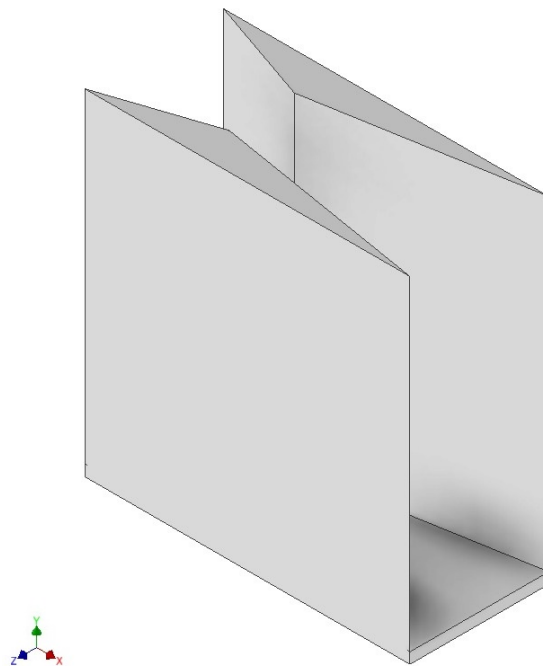


Figura 4.6: Diseño CAD Aforador sin cuello.



CAPÍTULO 5

Experimentos en el Canal Hidráulico

5.1. *Broad-Crested Weir*

5.1.1. Introducción

Usar una geometría de referencia en experimentos hidráulicos es de vital importancia para medir y comparar los flujos de agua en diferentes situaciones. Según [13] el uso de un *Broad-Crested Weir* (BCW) como obstáculo de referencia puede ser beneficioso debido a que es un dispositivo de medición de flujo relativamente simple y económico. Además, pueden medir caudales muy grandes y tienen buena precisión y además, son fáciles de instalar y mantener.

Partiendo de las medidas del canal anteriormente mencionadas, se ha llevado a cabo el primer experimento. Este consiste en la colocación de la estructura *Broad-Crested Weir* (cubo de madera) en el canal hidráulico. Sus dimensiones son: 5,70 centímetros de altura, 4,15 centímetros de longitud y 6,40 centímetros de anchura. Los resultados obtenidos servirán como referencia para las demás estructuras restantes que se someterán al mismo experimento.

5.1.2. Resultados experimentales

Tras realizar el experimento manualmente se recogieron los resultados oportunos correspondientes a los diferentes caudales. La relación píxel-centímetros determinada en este caso es de 1 centímetro equivalente a 30,5 píxeles.

En esta ocasión experimental el flujo de agua produjo una zona aireada, conocida comúnmente como burbuja al atravesar la geometría, mientras que el resalto hidráulico no es apreciable, tal y como se aprecia en la figura 5.1.

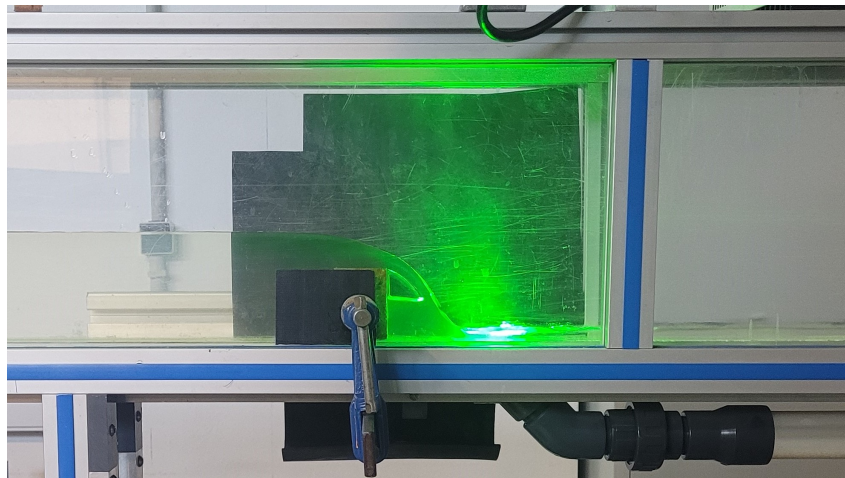


Figura 5.1: Experimento *Broad-Crested Weir* para un caudal de 2000 (l/h).

En las tablas 5.1, 5.2, 5.3 se pueden observar las medidas obtenidas. Cabe destacar, que para el cálculo del área transversal y velocidad media en la tabla 5.2 se ha hecho uso de la ecuación 2.5 y 3.1, respectivamente. Además, se añaden las medidas de la zona aireada y su relación de aspecto en aquellos caudales donde se produce.

Q (l/h)	Q (l/s)	$H1$ (cm)	$H2$ (cm)	$H3$ (cm)
1000	0,2778	7,8036	2,0987	0,8852
2000	0,5556	8,4695	2,8885	1,1151
3000	0,8333	9,2138	3,6066	1,2787
4000	1,1111	9,8328	4,1308	1,6721
5000	1,3889	10,3246	4,7200	1,9023

Tabla 5.1: Niveles del agua en los distintos puntos seleccionados para diferentes caudales.

Q (l/h)	Q (l/s)	A (cm ²)	V_{media} (m/s)	$V_{upstream}$ (cm/s)	$V_{downstream}$ (cm/s)
1000	0,2778	49,9431	0,5562	5,9016	29,5082
2000	0,5556	54,2049	1,0249	6,5574	59,0164
3000	0,8333	58,9681	1,4132	7,3770	59,0164
4000	1,1111	62,9298	1,7656	19,6721	59,0164
5000	1,3889	66,0774	2,1019	19,6721	59,0164

Tabla 5.2: Velocidad media y superficiales para diferentes caudales.

Q (l/h)	Q (l/s)	Altura (cm)	Longitud (cm)	AR
1000	0,2778	2,6561	1,7869	0,6728
2000	0,5556	2,0338	2,4269	1,1933
3000	0,8334	1,6072	2,3443	1,4586
4000	1,1111	0,8197	1,5902	1,9400
5000	1,3889	-	-	-

Tabla 5.3: Medidas de la zona aireada para diferentes caudales.

En la tabla 5.1 se muestran los niveles del agua en diferentes puntos seleccionados para diferentes caudales. Los caudales se presentan tanto en litros por hora (l/h) como en litros por segundo (l/s). Los niveles de agua se midieron en tres puntos, denominados como $H1$, $H2$, y $H3$, expresados en centímetros (cm). Los datos recopilados muestran cómo los niveles del agua aumentan con los diferentes incrementos de caudales, siendo el valor de $H1$ siempre el mayor seguido de $H2$ y por último $H3$.

En la tabla 5.2 se presentan los valores de la velocidad media y las velocidades superficiales para diferentes caudales. La velocidad media se da en metros por segundo (m/s), y las velocidades superficiales en centímetros por segundo (cm/s). Además, se incluye el área transversal (A) en centímetros cuadrados (cm²), que es relevante para el cálculo de la velocidad media. Se observa como tanto la velocidad media como la velocidad superficial “aguas arriba” aumentan a mayores caudales mientras que la velocidad superficial “aguas abajo” tan solo aumenta en el primer incremento del caudal, ya que en los demás mantiene el mismo valor. Posiblemente, esto se debe a que ya ha alcanzado su velocidad máxima y aunque se aumente el caudal esta permanecerá constante.

En la tabla 5.3 se muestran las medidas de la zona aireada para diferentes caudales. Las medidas incluyen la altura y la longitud, ambas expresadas en centímetros (cm), y el valor de la relación de aspecto (AR). Cabe destacar que para el último caudal, no se produjo la zona aireada, por lo tanto los datos no están disponibles. Se observa como la altura de la zona aireada disminuye con el aumento del caudal mientras que la longitud aumenta, excepto en el último caso.

Tras haber analizado con detalle todos los resultados obtenidos, a continuación se realizaron una serie de gráficas para poder visualizar de forma más intuitiva la relación existente entre las diferentes alturas y el caudal del flujo de agua.

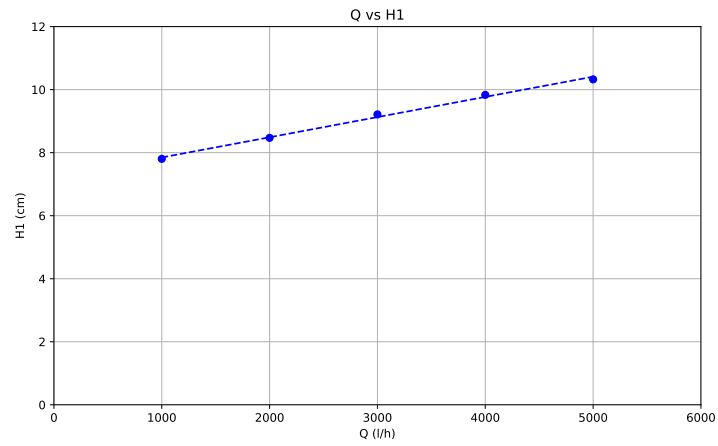


Figura 5.2: Altura antes del obstáculo (H1) frente al Caudal (Q).

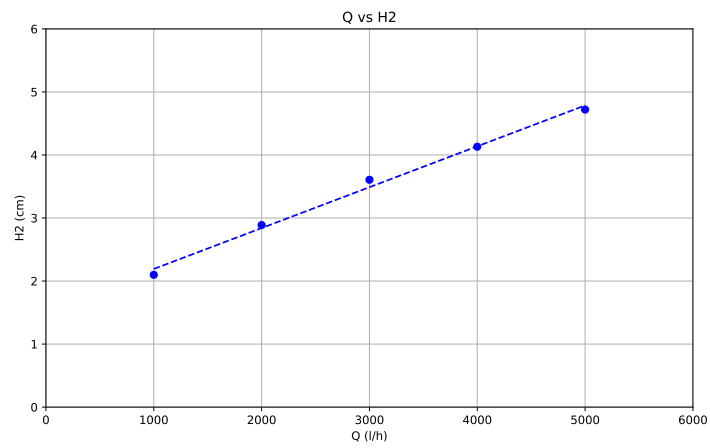


Figura 5.3: Altura de descarga (H2) frente al Caudal (Q).

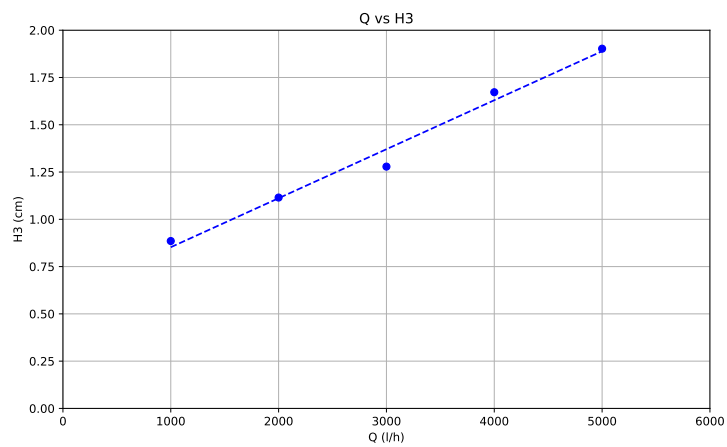


Figura 5.4: Altura después del obstáculo (H3) frente al Caudal (Q).

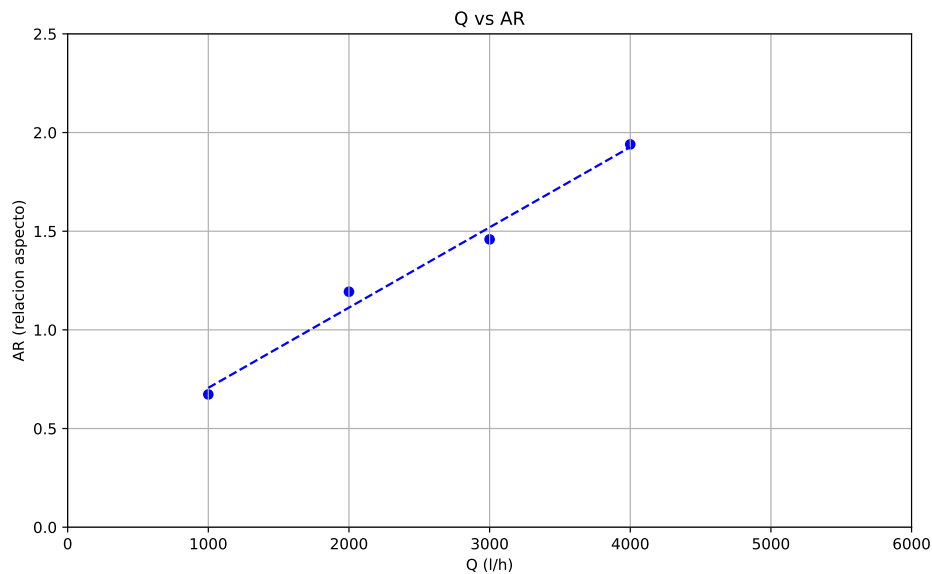


Figura 5.5: Relación de aspecto de la zona aireada (AR) frente al Caudal (Q).

En las figuras 5.2, 5.3 y 5.4, podemos observar las gráficas que muestran la evolución de la altura en los diferentes puntos del canal con respecto al caudal. Tras analizar las figuras mencionadas, se observa una tendencia ascendente, es decir, una línea recta creciente. Por lo tanto, se puede concluir que la altura del flujo del agua y el caudal tienen una relación positiva y proporcional entre ambas. Lo que significa que un incremento en el caudal se traduce en un incremento proporcional en la altura. Estos hallazgos respaldan la noción de que la altura y el caudal están estrechamente relacionados en un canal hidráulico. Es decir, a medida que aumenta el caudal, la altura también tiende a incrementarse.

Además, durante esta prueba también hemos analizado la relación entre el tamaño de la zona aireada y el caudal del agua. En la figura 5.5, se muestra claramente cómo estas dos variables están relacionadas de manera proporcional. Es decir, a medida que aumenta el caudal, la relación de aspecto de la burbuja también se incrementa. Es interesante destacar que conforme esta relación de aspecto se vuelve cada vez mayor, llegamos a un punto donde la burbuja finalmente desaparece. Esto ocurre en el último caso de nuestro experimento.

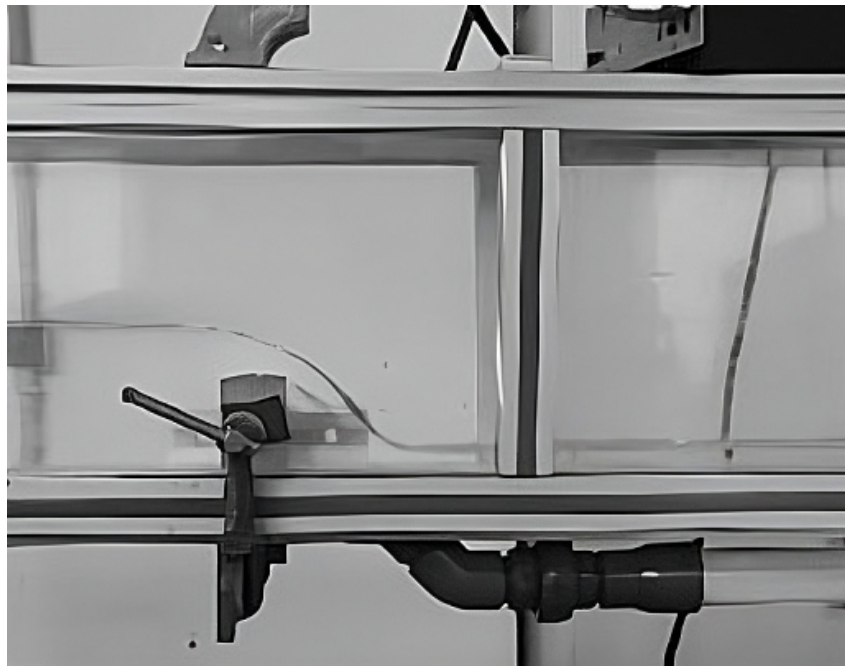


Figura 5.6: Imagen promedio experimento BCW para un caudal de 3000 (l/h).

Por último, la figura 5.6 muestra la imagen promedio considerada como la más significativa para el experimento *Broad-Crested Weir*, aquella en la que se aprecia mejor el comportamiento del flujo de agua frente al obstáculo. En este caso la imagen promedio elegida ha sido la correspondiente al caudal 3000 litros hora. Gracias a la imagen promedio podemos confirmar que el salto hidráulico en la zona aguas abajo no es apreciable, es más, el flujo de agua parece estar totalmente en calma.

5.1.3. Discusión de los Resultados

Los resultados experimentales obtenidos en el estudio del experimento *Broad-Crested Weir* muestran que al aumentar el caudal, todas las alturas (H_1 , H_2 , H_3) también aumentan, mientras que las velocidades medias y las velocidades superficiales “aguas arriba” aumentan y la velocidad superficial “aguas abajo” se mantiene constante, al alcanzar un máximo. Además, se observa que la altura de la zona aireada disminuye y su longitud aumenta con el incremento del caudal. Respecto al salto hidráulico, dicho fenómeno no se aprecia en ninguno de los casos. Hay ciertos efectos a tener en cuenta debido a la geometría del canal experimental, más concretamente al hecho de su relación de aspecto, ya que es especialmente más estrecho de lo habitual, ya que originalmente estaba concebido como un canal para estudiar procesos de sedimentación más que fenómenos hidráulicos. Ello hace que los efectos de pared o capa límite, así como la tensión superficial puedan tener una influencia que para anchuras mayores serían prácticamente despreciables [14].

5.2. *Ski Jump*

5.2.1. Introducción

A continuación, se va a evaluar la geometría *Ski Jump* previamente diseñada en el canal hidráulico experimental. En relación a los parámetros a considerar en las mediciones, la particularidad de esta segunda geometría radica en que también se medirá la distancia alcanzada y la altura máxima del flujo de agua, influenciadas por el ángulo de la zona de salto establecido en el diseño.

5.2.2. Resultados experimentales

Para realizar las medidas de manera precisa, se siguió rigurosamente el procedimiento experimental previamente explicado. La relación píxel-centímetros determinada en este caso es de 1 centímetro equivalente a 29 píxeles.

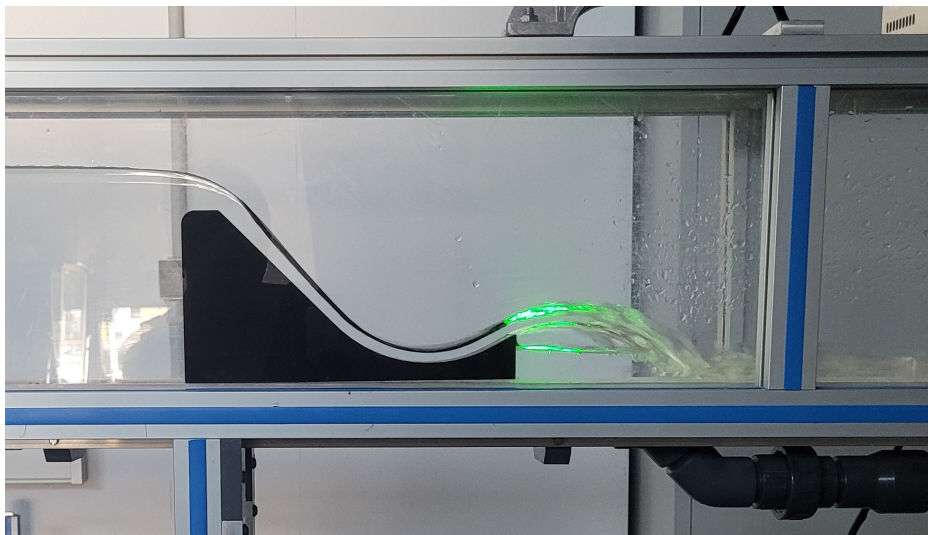


Figura 5.7: Experimento *Ski Jump* para un caudal de 3000 (l/h).

Durante el estudio de la geometría *Ski Jump* en el canal hidráulico experimental, se observó de nuevo la aparición de una zona aireada tal y como ya ocurrió en el experimento de referencia, *Broad-Crested Weir*. En la figura 5.7 se puede apreciar claramente como el flujo de agua tras encontrarse con la geometría *Ski Jump* adquiere su forma de manera natural formando una fina película sobre la misma, de escasos milímetros, acabando en su lanzamiento particular en forma de parábola. Este salto provoca que el flujo aguas abajo sea más irregular y turbulento. Este diseño particular permite una disipación eficiente de la energía del agua.

Además, se destaca que gracias a su particular diseño, el flujo aguas abajo logra alcanzar distancias mayores en comparación con las otras geometrías analizadas. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7.

Q (l/h)	Q (l/s)	$H1$ (cm)	$H2$ (cm)	$H3$ (cm)
1000	0,2778	14,6210	1,4486	0,6552
2000	0,5556	15,6021	1,9566	0,9793
3000	0,8333	16,2052	2,4697	1,4448
4000	1,1111	16,6272	2,9338	1,7500
5000	1,3889	17,3476	3,2431	2,2700

Tabla 5.4: Niveles del agua en los distintos puntos seleccionados para diferentes caudales.

Q (l/h)	Q (l/s)	V_{media} (m/s)	$V_{upstream}$ (cm/s)	$V_{downstream}$ (cm/s)
1000	0,2778	0,2969	4,5397	29,5082
2000	0,5556	0,5564	6,5574	59,0164
3000	0,8333	0,8035	9,8361	59,0164
4000	1,1111	1,0441	11,8033	59,0164
5000	1,3889	1,2510	14,7541	59,0164

Tabla 5.5: Velocidad media y superficiales para diferentes caudales.

Q (l/h)	Q (l/s)	$Alcance$ (cm)	H_{max} (cm)	A (cm ²)
1000	0,2778	9,5179	4,6555	93,5746
2000	0,5556	11,1690	4,7866	99,8532
3000	0,8333	14,0514	5,5590	103,7131
4000	1,1111	14,3083	6,6910	106,4143
5000	1,3889	15,1321	5,7666	111,0246

Tabla 5.6: Altura máxima, alcance y área transversal *Ski Jump*.

Q (l/h)	Q (l/s)	$Altura$ (cm)	$Longitud$ (cm)	AR
1000	0,2778	3,1038	8,7938	2,8332
2000	0,5556	2,5224	8,8014	3,4893
3000	0,8334	2,1617	10,0366	4,6428
4000	1,1111	1,7531	10,5510	6,0185
5000	1,3889	1,3907	11,9931	8,6239

Tabla 5.7: Valores zona aireada *Ski Jump* para diferentes caudales.

Al analizar las tablas, podemos identificar ciertas tendencias. En primer lugar, en la tabla 5.4, se muestra que la altura antes del obstáculo es la más alta de las tres, seguida por la altura de descarga y, por último, la altura aguas abajo. Lo interesante es que todas ellas aumentan a medida que el caudal crece. En cuanto a las velocidades, observamos en la tabla 5.5 que tanto la velocidad media como la velocidad superficial “aguas arriba” también aumentan con el incremento del caudal. Sin embargo, la velocidad superficial “aguas abajo” solo aumenta en la transición del primer al segundo valor de caudal, manteniéndose constante para los demás valores.

En cuanto a los parámetros específicos del *Ski Jump*, como el alcance y la altura máxima alcanzada por el flujo de agua después de superar la geometría, vemos en la tabla 5.6 que ambos crecen con el caudal, excepto la altura máxima en el último caso, que disminuye ligeramente. Por último, en relación a la relación de aspecto de la zona aireada formada, como se muestra en la tabla 5.7, observamos que aumenta a medida que aumenta el caudal.

Toda esta información y las tendencias respecto a las alturas y a la relación del aspecto, identificadas en las tablas 5.4 y 5.7, respectivamente, se presentarán de manera visual a través de gráficas, lo que nos permitirá obtener una visión completa y detallada de los resultados obtenidos en los experimentos.

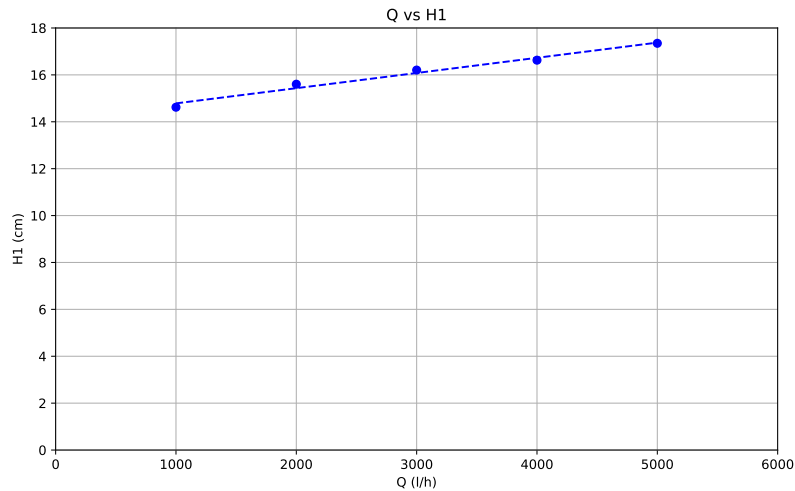


Figura 5.8: Altura antes del obstáculo (H1) frente al Caudal (Q).

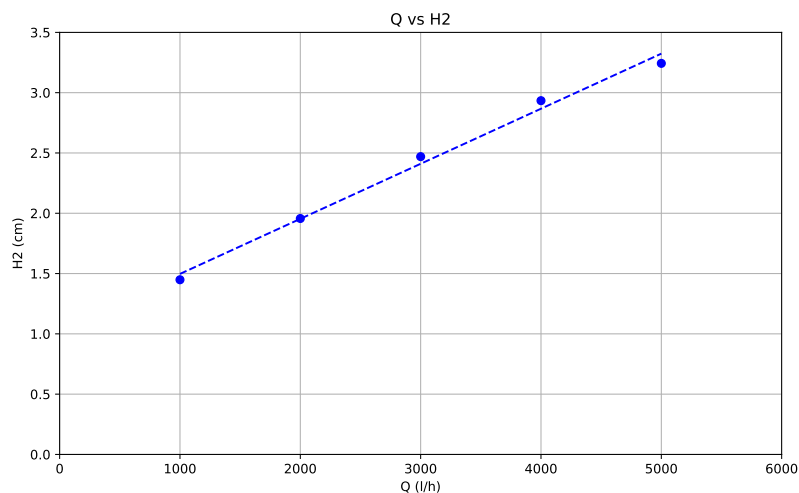


Figura 5.9: Altura antes del obstáculo (H2) frente al Caudal (Q).

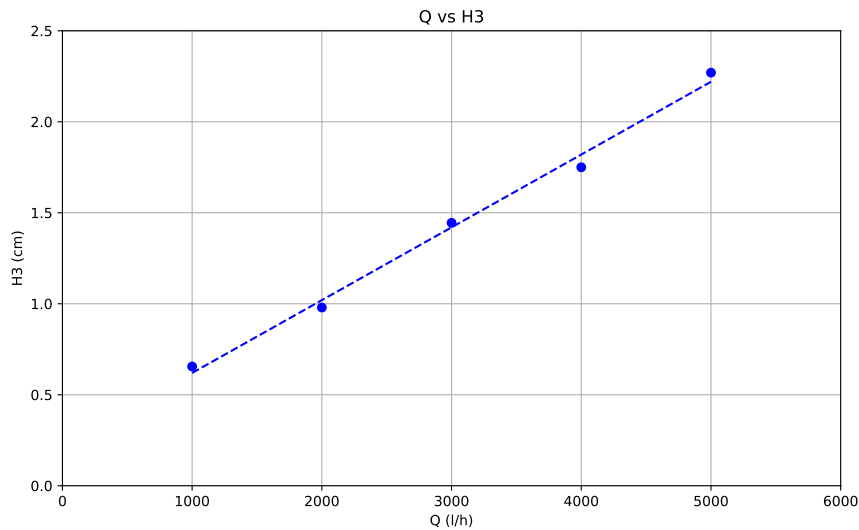


Figura 5.10: Altura antes del obstáculo (H3) frente al Caudal (Q).

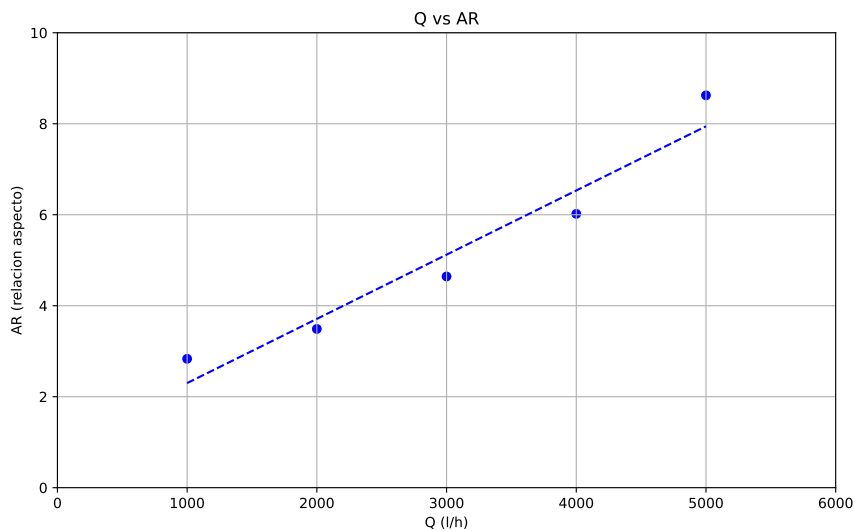


Figura 5.11: Relación de aspecto de la zona aireada (AR) frente al Caudal (Q).

Las gráficas 5.8, 5.9 y 5.10 presentan la variación de la altura en distintos puntos del canal en función del caudal. Después de analizar cuidadosamente estos gráficos, se observa un patrón ascendente, indicando una relación directa y proporcional entre la altura del flujo de agua y el caudal. Además, se ha estudiado la relación entre el tamaño de la zona aireada y el caudal del agua en la figura 5.11, mostrando una correlación directa. A medida que aumenta el caudal, la relación de aspecto de las burbujas también crece.

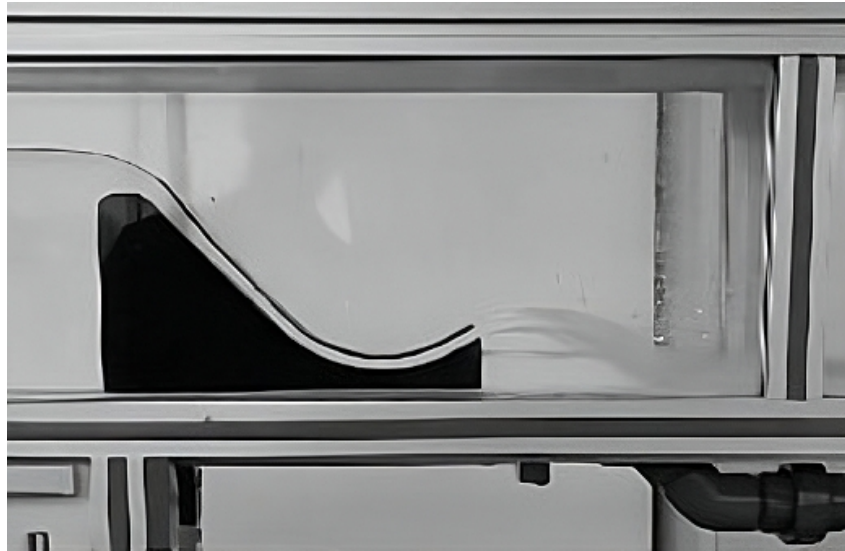


Figura 5.12: Imagen promedio experimento *Ski Jump* para un caudal de 3000 (l/h).

La figura 5.12 muestra la imagen promedio considerada como la más significativa para el experimento *Ski Jump*. En este caso la imagen promedio elegida ha sido la correspondiente al caudal 3000 litros hora. Gracias a la imagen promedio podemos confirmar que el salto hidráulico en la zona aguas abajo esta vez si es apreciable, se observa como el flujo de agua sufre un cambio abrupto respecto a la velocidad y altura tras rebasar la geometría *Ski Jump*.

5.2.3. Discusión de los resultados

El experimento realizado con la geometría del *Ski Jump* fue el primer diseño puesto a prueba en nuestro canal experimental. Las alturas aguas arriba, de descarga y aguas abajo aumentaron con el caudal, al igual que las velocidades, excepto la velocidad superficial “aguas abajo” que se mantiene mayormente constante, tal y como ocurría en el experimento de referencia, *Broad-Crested Weir*. La relación de aspecto también se incrementa con el aumento del caudal, al igual que los parámetros propios de esta geometría, el alcance y la altura máxima que alcanza el flujo del agua en el impulso. Cabe destacar que aunque la geometría *Ski Jump* es totalmente diferente a la usada en el experimento de referencia los resultados experimentales siguen la misma tendencia, aumentan con el incremento de caudal. La diferencia mas notoria entre estos dos primeros experimentos sería la visualización del resalto hidráulico, ya que mientras, en el primer caso este no es apreciable, con la geometría *Ski Jump* se ve claramente como después del ángulo del impulso el flujo es mucho mas abrupto e irregular intentando volver a un estado subcrítico.

Este hecho pone de manifiesto la importancia de este tipo de geometrías como elementos de disipación de energía a la salida del aliviadero de una presa, que es su aplicación habitual, tal y como se comentó. El hecho de alegar el punto de impacto de la corriente de la base de la estructura es positivo ya que minimiza la erosión en su base, que debido a la alta velocidad del agua puede ser peligrosa y llega a poner incluso en entredicho la integridad estructural de la misma.

5.3. *Multiple Staggered Deflector* o Vertedero Escalonado

5.3.1. Introducción

En esta sección, se ha llevado a cabo el mismo experimento utilizando la segunda geometría diseñada, el Vertedero Escalonado o “*Multiple Staggered Deflector*”, como obstáculo en el canal hidráulico. En este caso en particular, se han realizado dos pruebas la primera con la geometría de forma individual y una segunda donde se añadió un obstáculo a aproximadamente 60 centímetros de la geometría aguas abajo para aumentar la altura del flujo del agua tras rebasar la geometría.

5.3.2. Resultados experimentales

En la primera prueba se ha seguido con exactitud la metodología explicada, realizando la medición de los mismos parámetros. En la figura 5.13 se observa como la geometría estudiada presenta una mayor altura que el experimento de referencia y por lo tanto el caudal del flujo de agua tarda mucho más en rebasar la pieza. La relación píxel-centímetros determinada en este caso fue de 1 centímetro equivalente a 30,5 píxeles.

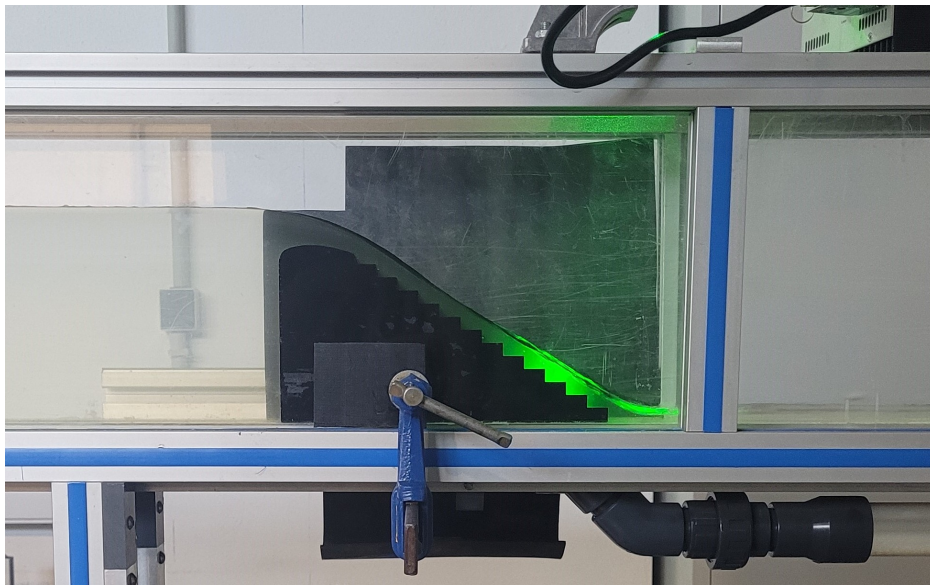


Figura 5.13: Experimento *Multiple Staggered Deflector* para un caudal de 2000 (l/h).

En esta ocasión la figura 5.13 muestra claramente como el resalto hidráulico es despreciable a la vista y como la estructura *Multiple Staggered Deflector* consigue eliminar la formación de la burbuja observada en el experimento de referencia, *Broad-Crested Weir*.

Las tablas 5.8 y 5.9 muestran los resultados obtenidos. En términos generales, los resultados obtenidos siguen las tendencias observadas en los experimentos anteriores.

Q (l/h)	Q (l/s)	$H1$ (cm)	$H2$ (cm)	$H3$ (cm)
1000	0,2778	13,8033	1,2462	0,7869
2000	0,5556	14,8154	2,0649	0,9177
3000	0,8333	15,5423	2,6233	1,2148
4000	1,1111	16,0987	3,0164	1,3446
5000	1,3889	16,6561	3,5082	1,6393

Tabla 5.8: Niveles del agua en los distintos puntos seleccionados para diferentes caudales.

Q (l/h)	Q (l/s)	A (cm ²)	V_{media} (m/s)	V_{upstream} (cm/s)	$V_{\text{downstream}}$ (cm/s)
1000	0,2778	88,3410	0,3144	5,2496	29,5082
2000	0,5556	94,8186	0,5859	6,5574	59,0164
3000	0,8333	99,4707	0,8378	9,8361	59,0164
4000	1,1111	103,0316	1,0784	11,8033	59,0164
5000	1,3889	106,5988	1,3029	19,6721	59,0164

Tabla 5.9: Velocidad media y superficiales para diferentes caudales.

En la tabla 5.8 se presentan los niveles del agua en diferentes puntos seleccionados para distintos caudales. Se puede observar que a medida que aumenta el caudal, los niveles de agua en los tres puntos también incrementan.

En la tabla 5.9 se encuentran los valores de la velocidad media y las velocidades superficiales para diferentes caudales. Se observa que tanto la velocidad media como la velocidad superficial “aguas arriba” aumentan con el incremento del caudal, mientras que la velocidad superficial “aguas abajo” se mantiene constante para todos los valores de caudal, excepto el primero. Además, el área transversal también aumenta con el aumento del caudal.

Como se ha hecho en todos los experimentos anteriores, con el propósito de visualizar y examinar de forma clara la información recopilada, se crearon una variedad de representaciones gráficas. En las figuras 5.14, 5.15 y 5.16, podemos observar las gráficas que muestran la evolución de la altura en los diferentes puntos del canal con respecto al caudal.

Tras analizar las figuras 5.14, 5.15 y 5.16, se observa una tendencia ascendente, es decir, una línea recta creciente. Por lo tanto, se puede concluir que la altura del flujo del agua y el caudal tienen una relación positiva y proporcional entre ambas, tal y como ocurría en el experimento de referencia *Broad-Crested Weir*.

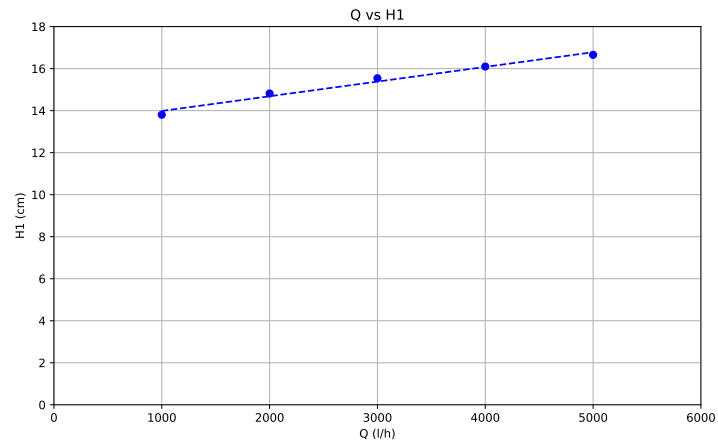


Figura 5.14: Altura antes del obstáculo (H1) frente al Caudal (Q).

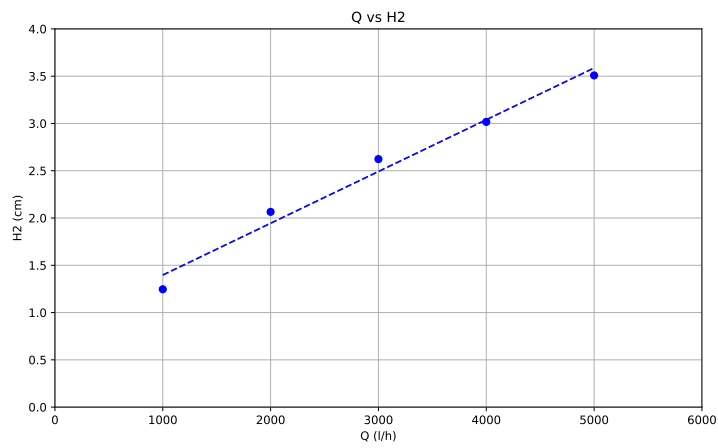


Figura 5.15: Altura de descarga (H2) frente al Caudal (Q).

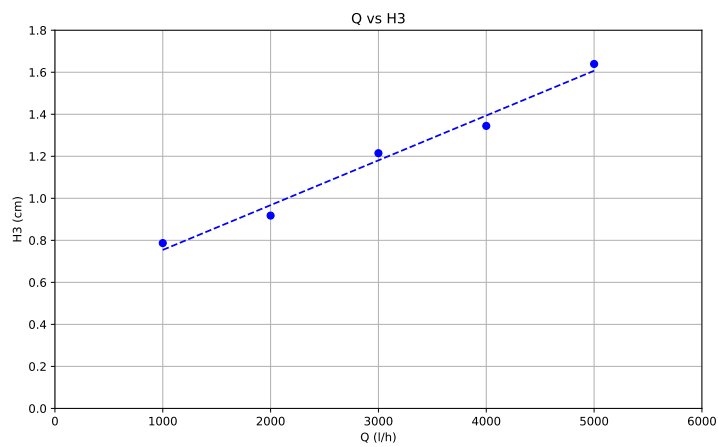


Figura 5.16: Altura después del obstáculo (H3) frente al Caudal (Q).

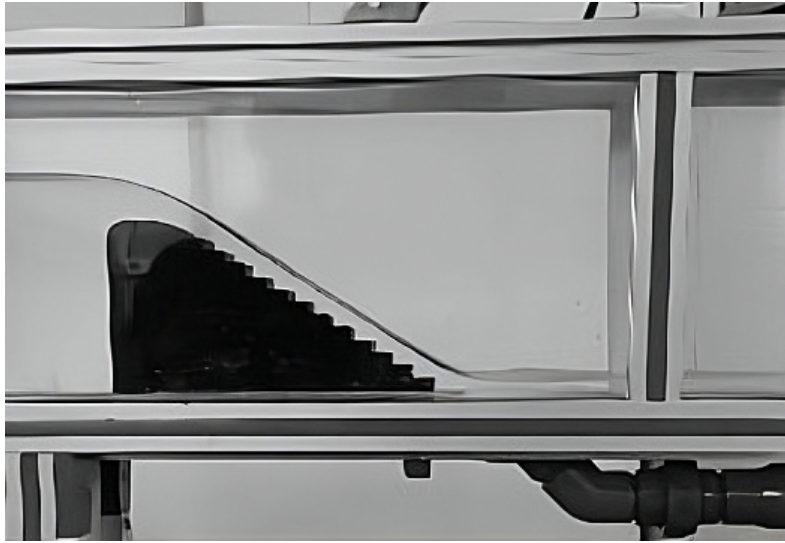


Figura 5.17: Imagen promedio experimento *Multiple Staggered Deflector* para un caudal de 3000 (l/h).

La figura 5.17 muestra la imagen promedio considerada como la más significativa para el experimento *Multiple Staggered Deflector*. En este caso la imagen promedio elegida ha sido también la correspondiente al caudal 3000 litros hora. Respecto al salto hidráulico esta vez no es apreciable.

5.3.3. Resultados experimentales con obstáculo aguas abajo

Esta segunda prueba se ha realizado también con la geometría *Multiple Staggered Deflector*. No obstante, su particularidad reside en que se ha colocado un obstáculo (ver figura 5.18) aguas abajo, con la intención de simular la estructura bajo agua de un puente. Esta novedad provoca que la altura del flujo del agua después del *Multiple Staggered Deflector* aumente de forma notable. Este aumento de la altura de agua crea la presencia del salto hidráulico sumergido previamente comentado, el cual se puede apreciar en la figura 5.19.

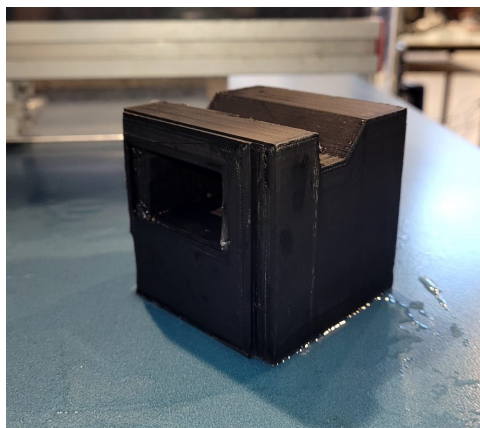


Figura 5.18: Obstáculo utilizado en la segunda prueba experimental.

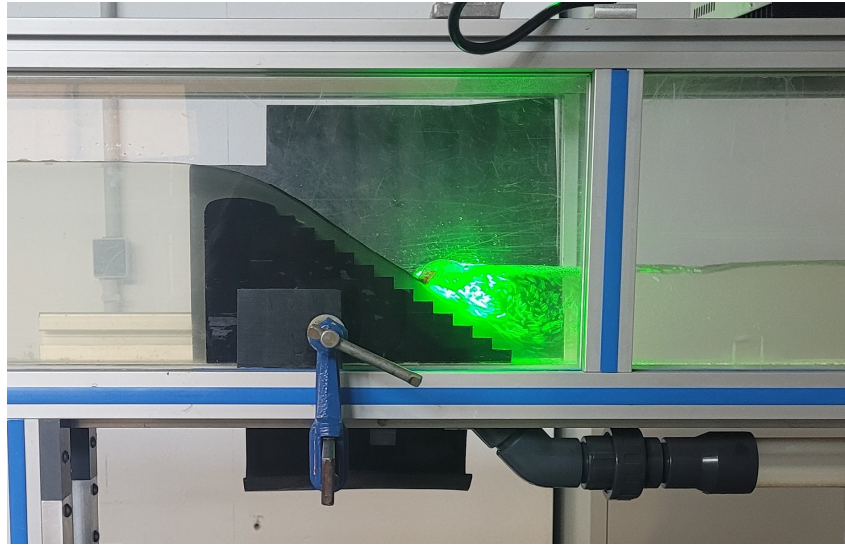


Figura 5.19: Experimento *Multiple Staggered Deflector* con obstáculo para un caudal de 2000 (l/h).

En esta ocasión la figura 5.19 muestra claramente como el resalto hidráulico sumergido es apreciable y como la estructura *Multiple Staggered Deflector* no consigue eliminar la formación de la “Maquina de ahogamiento”.

Imaginemos que una persona intenta cruzar nuestro canal. Al caer al agua, ésta será arrastrada y golpeada repetidamente por la corriente generada por la presa, lo que provoca que se sumerja una y otra vez. Este ciclo continuo hace que sea imposible para la persona escapar del canal, y lamentablemente, suele resultar en un caso de ahogamiento de ahí su “apodo”. En consecuencia, se concluye que la geometría diseñada no sería la adecuada para evitar ese fenómeno y se deben realizar modificaciones con el objetivo de eliminar el salto hidráulico sumergido.

Las tablas 5.10, 5.11 y 5.12 muestran los resultados obtenidos.

Q (l/h)	Q (l/s)	$H1$ (cm)	$H2$ (cm)	$H3$ (cm)
1000	0,2778	13,9964	1,3223	5,0895
1600	0,4444	14,8770	1,7134	6,3148
2000	0,5556	15,0239	1,9092	7,1475
2600	0,7222	15,6134	2,3023	8,5666
3000	0,8333	15,8584	2,4482	8,8590

Tabla 5.10: Niveles del agua en los distintos puntos seleccionados para diferentes caudales.

Q (l/h)	Q (l/s)	A (cm ²)	V_{media} (m/s)	V_{upstream} (cm/s)	$V_{\text{downstream}}$ (cm/s)
1000	0,2778	89,5769	0,3101	8,4309	-
1600	0,4445	95,2131	0,4668	7,3770	-
2000	0,5556	96,1532	0,5778	9,8361	-
2600	0,7222	99,9260	0,7228	9,8361	-
3000	0,8333	101,4935	0,8211	11,8033	-

Tabla 5.11: Velocidad media y superficiales para diferentes caudales.

Q (l/h)	Q (l/s)	<i>Longitud</i>
1000	0,2778	295,5200
1600	0,4444	323,7770
2000	0,5556	372,1100
2600	0,7222	419,4700
3000	0,8333	452,1300

Tabla 5.12: Longitud vórtice hidráulico.

La tabla 5.10 muestra los niveles del agua en diferentes puntos del canal para distintos caudales. Se observa que a medida que aumenta el caudal, los niveles de agua en los tres puntos también aumentan.

En la tabla 5.11, se presentan los valores de la velocidad media y las velocidades superficiales para diferentes caudales. También se incluye el área transversal (A) en centímetros cuadrados (cm²), que es relevante para el cálculo de la velocidad media. Se observa que la velocidad media y la velocidad superficial “aguas arriba” aumentan con el incremento del caudal, mientras que la velocidad superficial “aguas abajo” no está registrada, ya que tal y como se mencionó previamente la máquina de ahogamiento hace que el barco que se usa para calcular las velocidades superficiales quede atrapado sin poder volver a la superficie y por lo tanto es imposible registrar dicha velocidad.

Por último, la tabla 5.12 presenta los valores de la longitud de la especie de remolino formado por el salto hidráulico sumergido para diferentes caudales. Los caudales se muestran en litros por hora (l/h) y litros por segundo (l/s), mientras que la longitud se expresa en centímetros (cm), aumenta a medida que aumenta el caudal.

Para comprender mejor los resultados obtenidos, se crearon una variedad de representaciones gráficas. En las figuras 5.20, 5.21 y 5.22, podemos observar las gráficas que muestran la evolución de la altura en los diferentes puntos del canal con respecto al caudal.

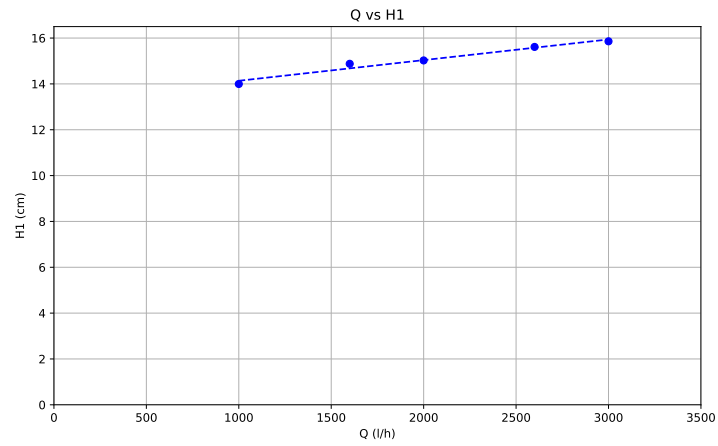


Figura 5.20: Altura antes del obstáculo (H1) frente al Caudal (Q).

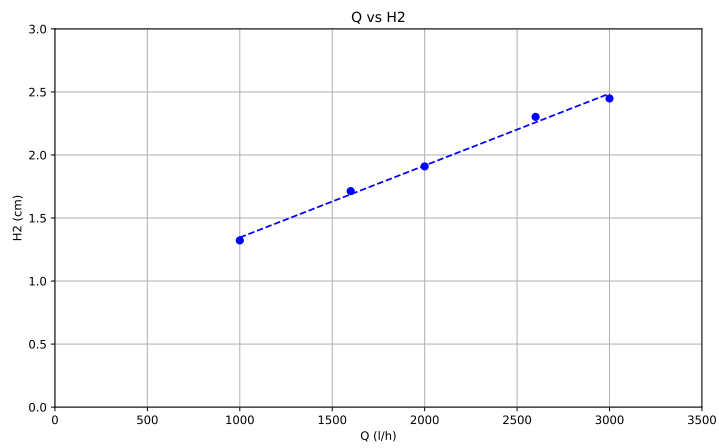


Figura 5.21: Altura de descarga (H2) frente al Caudal (Q).

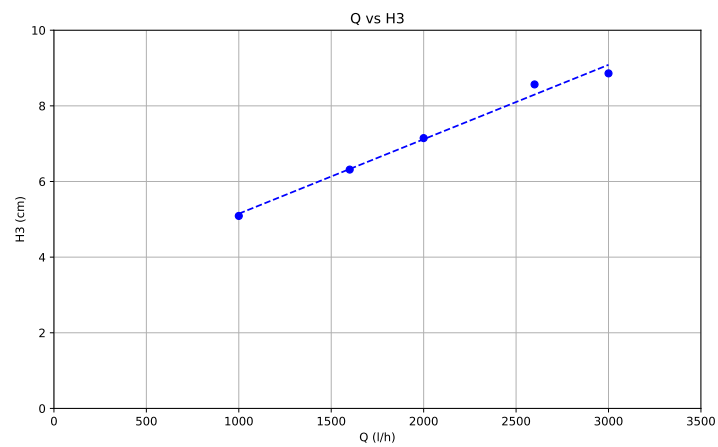


Figura 5.22: Altura después del obstáculo (H3) frente al Caudal (Q).

Tras analizar las figuras 5.20, 5.21 y 5.22, se vuelve a observar una tendencia ascendente, es decir, una línea recta creciente. Por lo tanto, se puede concluir que la altura del flujo del agua y el caudal tienen una relación positiva y proporcional entre ambas.

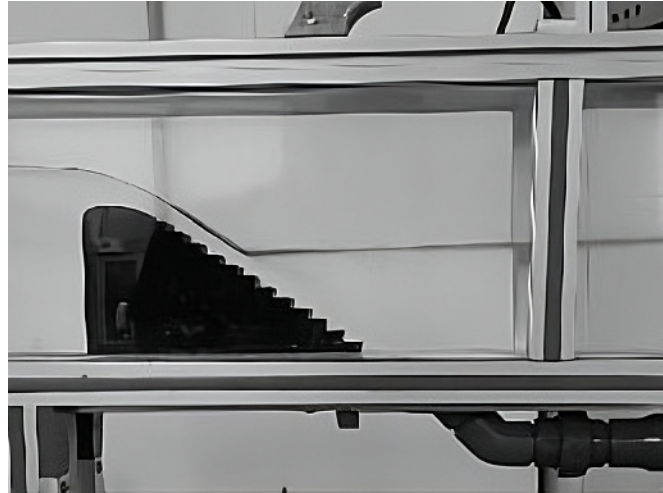


Figura 5.23: Imagen promedio experimento *Multiple Staggered Deflector* para un caudal de 3000 (l/h).

La figura 5.23 muestra la imagen promedio correspondiente al caudal 3000 litros hora. Respecto al salto hidráulico, tal y como se observó en la figura 5.19, en este caso es fácil de observar, se aprecia el remolino causado por las burbujas de aire del salto hidráulico sumergido. Sin embargo, en la imagen promedio que estamos considerando, este fenómeno ya no es perceptible. Esto se debe a que esta imagen es el resultado de la suma de todos y cada uno de los frames del vídeo del experimento cuando se llevó a cabo. Puede haber momentos en los que el fenómeno no sea claramente visible y esos momentos podrían haber influido en el resultado final. Además, el uso de blanco y negro hace que sea aún más difícil distinguirlo.

5.3.4. Discusión de los resultados

Al comparar los dos experimentos con la geometría de *Multiple Staggered Deflector*, se observa que ambos aumentan la altura del flujo de agua y las velocidades a medida que aumenta el caudal. Sin embargo, en la segunda prueba, al poner un obstáculo “aguas abajo”, la altura del agua después del obstáculo aumentó significativamente ($H3$), mientras que las alturas antes del obstáculo ($H1$ y $H2$) apenas cambiaron. En cuanto a las velocidades, en la primera prueba aumentaron más, alcanzando una velocidad media máxima de 1.3029 cm/s, mientras que en la segunda prueba fue de 0.8211 cm/s. La velocidad superficial “aguas arriba” fue mayor en la segunda prueba a bajos caudales (8.4309 cm/s frente a 5.2496 cm/s), pero en la primera prueba aumentó más, llegando a 19.6721 cm/s en comparación con 11.8033 cm/s en la segunda prueba. La velocidad superficial “aguas abajo” no se puede comparar, ya que desaparece en la segunda prueba, al igual que los parámetros específicos provocados por el salto hidráulico sumergido. En comparación con el experimento de referencia, se observa que los resultados experimentales vuelven a seguir la misma tendencia, aumentan sus valores con un caudal mayor.

5.4. *Cutthroat Flume* o Aforador sin garganta

5.4.1. Introducción

En esta sección, exploraremos el comportamiento de la última geometría diseñada, *Cutthroat Flume*. Al igual que en el caso anterior, se realizaron dos pruebas: una primera solo con la geometría mencionada y una segunda con la adición del obstáculo mostrado en la figura 5.18, ubicado a unos 60 centímetros aproximadamente del aforador. El propósito de este obstáculo es aumentar la altura del flujo aguas abajo para comprobar si se sigue comportando de la misma manera. Es importante mencionar que en este experimento se recopilan las mismas medidas que siempre, pero con la particularidad de medir la altura del flujo del agua justo a la salida del *Cutthroat Flume*.

5.4.2. Resultados experimentales

En este experimento, como mencionamos antes, tomamos las medidas habituales que ya hemos utilizado en casos anteriores. La relación píxel-centímetros determinada en este caso es de 1 centímetro equivalente a 26 píxeles. Sin embargo, en esta ocasión, también medimos la altura del flujo de agua justo después del *Cutthroat Flume*. Para hacerlo, utilizamos la geometría llamada *Cutthroat Flume* que fue impresa en 3D, pegamos una cinta en ella y marcamos puntos a cada centímetro a lo largo de la misma. De esta manera, pudimos observar hasta qué punto llegaba el flujo de agua, como se muestra en la figura 5.24.

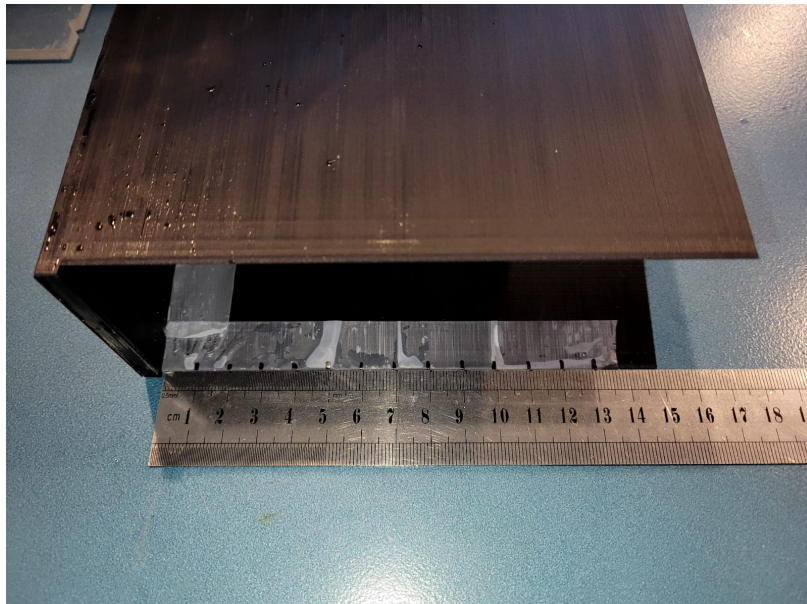


Figura 5.24: Niveles marcados en el Aforador.

A continuación, en las tablas 5.13 y 5.14 se pueden observar todos los resultados obtenidos.

Q (l/h)	Q (l/s)	$H1$ (cm)	$H2$ (cm)	H_{aforador} (cm)
2000	0,5556	4,3469	1,0392	1,0000
4000	1,1111	12,5735	3,5038	1,7000
5000	1,3889	14,5246	4,3054	2,0000

Tabla 5.13: Niveles del agua en los distintos puntos seleccionados para diferentes caudales.

Q (l/h)	Q (l/s)	A (cm ²)	V_{media} (m/s)	V_{upstream} (cm/s)	$V_{\text{downstream}}$ (cm/s)
2000	0,5556	27,8203	1,9969	11,5385	69,2308
4000	1,1111	80,4702	1,3808	17,3077	69,2308
5000	1,3889	92,9575	1,4941	23,0769	69,2308

Tabla 5.14: Velocidad media y superficiales para diferentes caudales.

En la tabla 5.13, se presentan los niveles del agua en diferentes puntos seleccionados para distintos caudales en un canal. Se puede observar que a medida que aumenta el caudal (expresado en litros por hora y litros por segundo), los niveles de agua en los puntos $H1$, $H2$ y H_{aforador} también aumentan. Por ejemplo, cuando el caudal es de 2000 l/h, los niveles de agua en $H1$, $H2$ y H_{aforador} son 4.3469 cm, 1.0392 cm y 1.0 cm, respectivamente. Sin embargo, a medida que el caudal aumenta a 5000 l/h, los niveles de agua en los mismos puntos aumentan a 14.5246 cm, 4.3054 cm y 2.0 cm, respectivamente.

Por otro lado, en la tabla 5.14, se muestran las velocidades media y superficiales para los mismos caudales. Se puede observar que la velocidad media y la velocidad superficial “aguas arriba” aumentan a medida que el caudal se incrementa. Por ejemplo, cuando el caudal es de 2000 l/h, la velocidad media es de 1.9969 m/s y la velocidad superficial “aguas arriba” es de 11.5385 cm/s. Sin embargo, cuando el caudal aumenta a 5000 l/h, la velocidad media aumenta a 1.4941 m/s y la velocidad superficial “aguas arriba” a 23.0769 cm/s. Por otro lado, la velocidad superficial “aguas abajo” se mantiene constante en 69.2308 cm/s para todos los caudales. Estos resultados indican que a mayores caudales, las velocidades del flujo de agua aumentan, mientras que la velocidad superficial “aguas abajo” permanece constante.

En este estudio, para comprender mejor cómo se comporta el flujo de agua en relación a la cantidad que fluye por el canal, se han representado los datos recopilados en la tabla 5.13 mediante tres gráficas: 5.25, 4.6, y 4.7. Estas gráficas nos permiten visualizar de manera más clara las tendencias y relaciones entre las variables estudiadas.

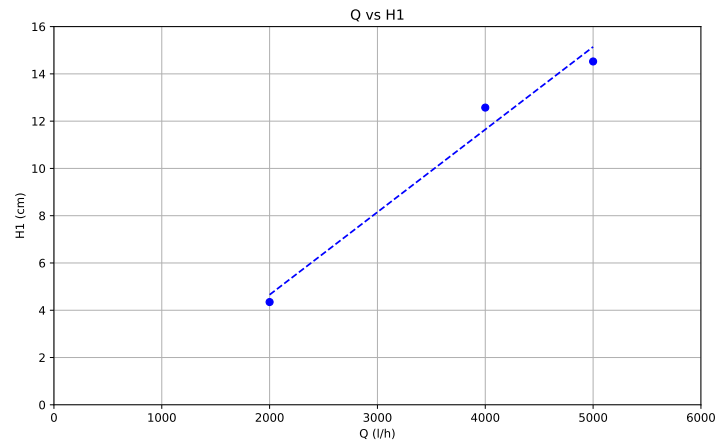


Figura 5.25: Altura antes del *Cutthroat Flume* (H1) frente al Caudal (Q).

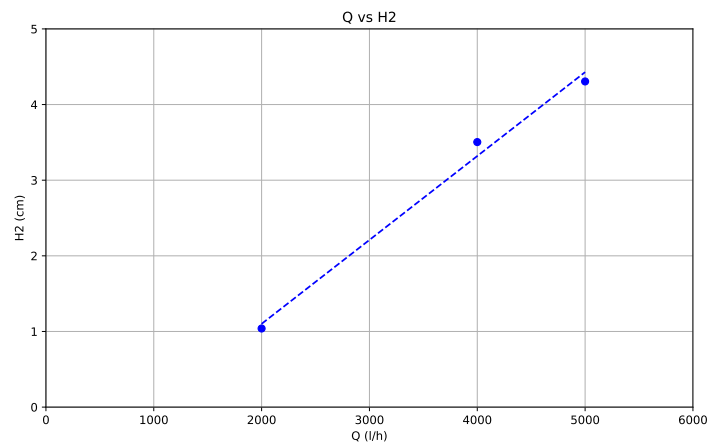


Figura 5.26: Altura después del *Cutthroat Flume* (H2) frente al Caudal (Q).

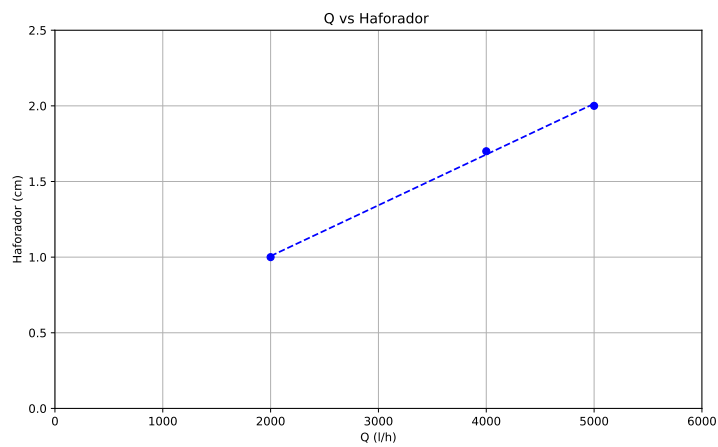


Figura 5.27: Altura del flujo en el *Cutthroat Flume* (H aforador) frente al Caudal (Q).

En todas las figuras se representa el caudal del flujo de agua, expresado tanto en litros por hora (Q (l/h)) como en litros por segundo (Q (l/s)). A medida que el caudal aumenta, se puede observar que las demás variables también presentan incrementos. En las figuras 5.25 y 4.6 se encuentran las alturas $H1$ y $H2$, medidas en centímetros, antes y después del aforador respectivamente. Estas alturas aumentan progresivamente con el caudal, lo que indica que el flujo se vuelve más profundo a medida que aumenta el caudal.

Finalmente, en la figura 5.27 se muestra la altura del agua justo en la salida del aforador (H_{aforador}), y también aumenta conforme se incrementa el caudal. Estos datos revelan la relación entre el caudal y las diferentes alturas del flujo de agua.



Figura 5.28: Imagen promedio experimento *Cutthroat Flume* para un caudal de 2000 (l/h).

La figura 5.28 muestra la imagen promedio correspondiente al caudal 2000 litros hora. En relación al salto hidráulico, no es posible observar este fenómeno en la imagen. Además, la imagen promedio proporciona escasa información, dado que la mayor parte del trayecto del flujo está oculta por el aforador; únicamente se puede apreciar antes y después de este.

5.4.3. Resultados experimentales con obstáculo aguas abajo

Esta segunda prueba se ha realizado también con la geometría *Cutthroat Flume*. No obstante, su particularidad reside en que se ha colocado un obstáculo (ver figura 5.18) aguas abajo, con la intención de simular la estructura bajo agua de un puente. Esta novedad provoca que la altura del flujo del agua después de la geometría aumente de forma notable. Los resultados obtenidos se observan en las tablas 5.15 y 5.16.

Q (l/h)	Q (l/s)	H_1 (cm)	H_2 (cm)	H_{aforador} (cm)
2000	0,5556	13,7138	12,9677	6,5000
4000	1,1111	17,1665	16,3038	8
5000	1,3889	18,1908	17,0419	8,5000

Tabla 5.15: Niveles del agua en los distintos puntos seleccionados para diferentes caudales.

Q (l/h)	Q (l/s)	Sección (cm)	V_{media} (m/s)	V_{upstream} (cm/s)	$V_{\text{downstream}}$ (cm/s)
2000	0,5556	87,7686	0,6330	17,3077	23,0769
4000	1,1111	109,8658	1,0113	11,5385	9,8901
5000	1,3889	116,4209	1,1930	7,6923	5,3254

Tabla 5.16: Velocidad media y superficiales para diferentes caudales.

En la tabla 5.15 se presentan los niveles del agua en distintos puntos seleccionados para diferentes caudales. Podemos observar cómo los niveles aumentan a medida que se incrementa el caudal, lo que indica una relación directa entre la cantidad de agua que fluye y la altura del agua en los puntos analizados.

Por otro lado, en la tabla 5.16 se muestran las velocidades medias y superficiales para diferentes caudales. Aquí también se puede apreciar una tendencia interesante: a medida que el caudal aumenta, la velocidad media y las velocidades superficiales también se incrementan, aunque en algunas ocasiones las velocidades superficiales “aguas abajo” disminuyen para ciertos valores de caudal.

A partir de la tabla 5.15 se han elaborado figuras para visualizar de manera más clara las tendencias de los niveles del agua en los distintos puntos seleccionados en función de los diferentes caudales. Estas representaciones gráficas nos ayudan a comprender de forma más intuitiva los resultados obtenidos en la investigación.

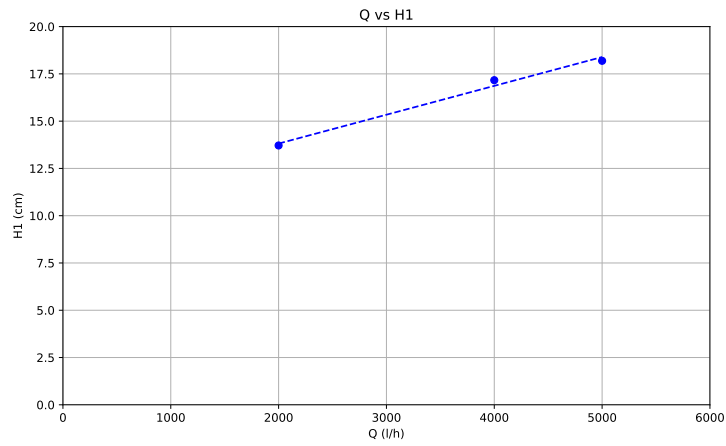


Figura 5.29: Altura antes del *Cutthroat Flume* (H1) frente al Caudal (Q).

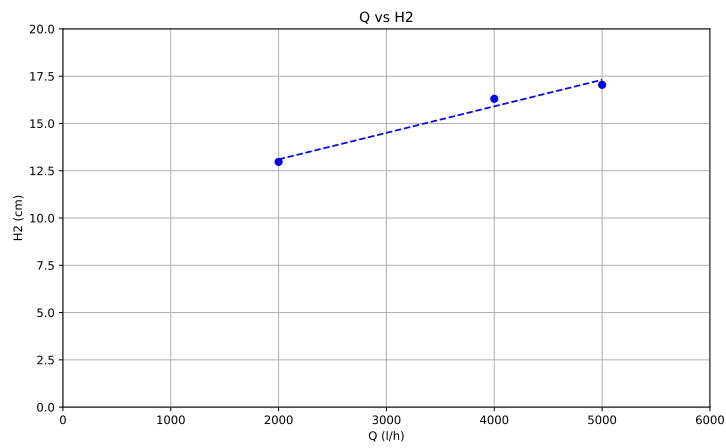


Figura 5.30: Altura después del *Cutthroat Flume* (H2) frente al Caudal (Q).

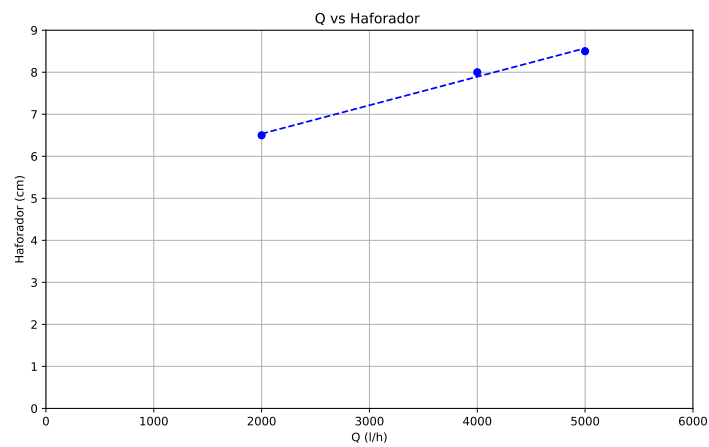


Figura 5.31: Altura del flujo en el *Cutthroat Flume* (H aforador) frente al Caudal (Q).

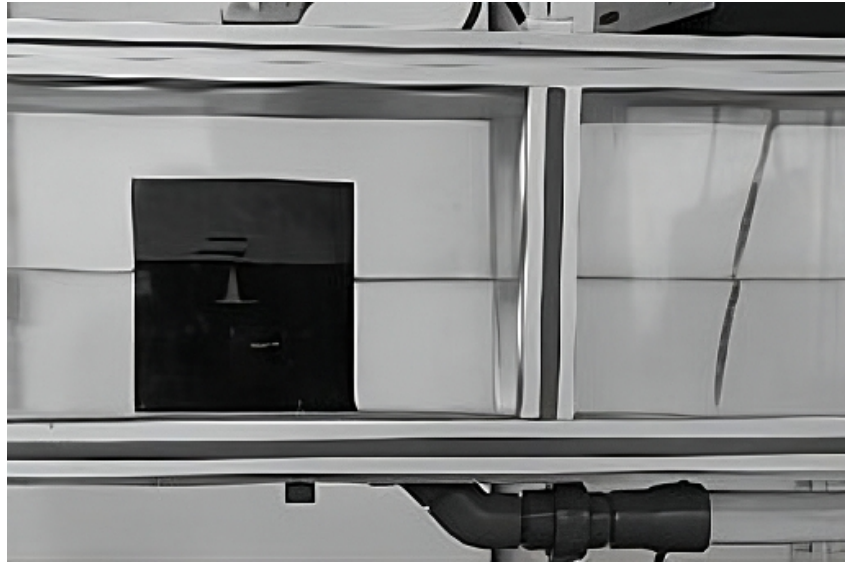


Figura 5.32: Imagen promedio experimento *Cutthroat Flume* para un caudal de 2000 (l/h).

La figura 5.32 muestra la imagen promedio correspondiente al caudal 2000 litros hora. En relación al salto hidráulico, no es posible observar este fenómeno en la imagen. Además, la imagen promedio proporciona escasa información como ocurría en la primera prueba. Observando la imagen promedio parece que la altura del flujo aguas arriba y abajo llega a coincidir.

5.4.4. Discusión de los resultados

En ambos experimentos con la geometría de aforador, se estudió el comportamiento del flujo de agua a diferentes caudales. En el primer experimento, los niveles del agua en los puntos $H1$, $H2$ y H_{aforador} aumentaron a medida que el caudal se incrementó. Lo mismo ocurrió con las velocidades media y superficiales. Sin embargo, en el segundo experimento, los niveles del agua también aumentaron con el caudal, pero en este caso, los valores iniciales de los niveles de agua ($H1$, $H2$ y H_{aforador}) fueron mayores en comparación con el primer experimento. Además, las velocidades media y superficiales en el segundo experimento fueron más bajas que en el primero, aunque también mostraron un incremento con el aumento del caudal. Cabe destacar que, al haber una relación prácticamente lineal entre el caudal circulante y la H_{aforador} , esta geometría tiene gran utilidad como medidor de caudal.

En resumen, ambos experimentos comparten la tendencia de que a medida que aumenta el caudal, los niveles del agua y las velocidades también aumentan, tal y como ocurría en el experimento de referencia. Sin embargo, difieren en los valores iniciales de los niveles de agua y las velocidades, lo que sugiere que la geometría utilizada en el segundo experimento complementada con el obstáculo aguas abajo podría generar condiciones de flujo más rápidas y con niveles de agua más altos en comparación con la geometría del primer experimento.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y Líneas futuras de Investigación

Para poder realizar una conclusión general, se procede a resumir lo observado anteriormente en cada uno de los experimentos de forma individual. Respecto al experimento *Broad-Crested Weir* (BCW), el que usamos como referencia, se observó que a medida que aumenta el caudal, todas las alturas (H_1 , H_2 , H_3) también aumentan. Las velocidades medias y las velocidades superficiales “aguas arriba” aumentan y alcanzan un máximo. La velocidad superficial “aguas abajo” se mantiene constante. La altura de la zona aireada disminuye y su longitud aumenta con el incremento del caudal.

Respecto al experimento *Ski Jump*, a medida que aumenta el caudal, las alturas antes del obstáculo, de descarga y aguas abajo aumentan. Las velocidades media y superficiales “aguas arriba” también aumentan. La velocidad superficial “aguas abajo” se mantiene mayormente constante. El alcance y la altura máxima del flujo del agua en el resalto aumentan con el caudal.

Respecto al experimento *Multiple Staggered Deflector* (MSD), en la primera prueba a medida que aumenta el caudal, los niveles del agua (H_1 , H_2 , H_3) y las velocidades media y superficiales aumentan. La velocidad superficial “aguas arriba” es mayor en comparación con la segunda prueba. En la segunda prueba, a medida que aumenta el caudal, los niveles del agua (H_1 , H_2 , H_3) y las velocidades media y superficiales aumentan. La velocidad superficial “aguas arriba” es mayor a bajos caudales en comparación con la primera prueba. La velocidad superficial “aguas abajo” no está presente.

Respecto al experimento *Cutthroat Flume*, en ambos experimentos con aforador, los niveles del agua y las velocidades aumentan a medida que aumenta el caudal. Sin embargo, los valores iniciales de los niveles de agua y las velocidades son diferentes entre los dos experimentos. En consecuencia, a partir de los resultados comentados se pueden inferir las siguientes conclusiones principales:

- El canal hidráulico experimental del Laboratorio de Mecánica de Fluidos, ha demostrado ser un dispositivo experimental adecuado para su utilización en el análisis del desempeño de estructuras hidráulicas de distinto tipo.
- Se ha constatado la peligrosidad de los saltos hidráulicos sumergidos, ya que la estructura de flujo formada impide que, una vez dentro, se pueda emerger fácilmente desde el fondo.
- Los resultados arrojados por cada obstáculo son muy cercanos a los esperados por la teoría, por lo que este tipo de geometrías serán útiles para implementar futuras prácticas para el Máster en Hidráulica Ambiental.



Adicionalmente, a raíz de los resultados, se sugieren las siguientes líneas futuras de trabajo:

- Emplear los resultados experimentales obtenidos para validar simulaciones numéricas con códigos comerciales (Fluent, OpenFoam, etc.).
- Emplear técnicas experimentales tales como LDA o PIV para medir de manera más exacta el perfil de velocidad del flujo antes y después de los obstáculos.
- Modificar la geometría escalonada para minimizar de manera efectiva el efecto del resalto hidráulico sumergido, que es tan peligroso en la vida real. Esta línea de estudio representa un paso adelante en la búsqueda de soluciones más seguras y efectivas en el diseño de estructuras hidráulicas y su enseñanza aplicada.
- Modificar el *Ski Jump*, se sugiere la realización de nuevos experimentos con variaciones en el ángulo de la zona del resalto. Esto permitiría comparar el alcance y la altura máxima alcanzada entre los diferentes diseños, lo que puede arrojar luz sobre el comportamiento hidrodinámico de dicha geometría y su potencial optimización para diversas aplicaciones prácticas.
- Respecto al *Cutthroat Flume*, otra área de interés para futuras investigaciones sería la realización de variaciones en su longitud para modificar el grosor de la garganta. Esta modificación permitiría comparar diferentes casos y profundizar en la comprensión de su comportamiento y precisión en la medición de caudales, contribuyendo así al avance de la tecnología de medición hidráulica.



Bibliografía

1. M. H. Chaudhry, [2022], “*Open-channel Flow*”, Springer.
2. R. L. Moreno, D. A. V. Rodríguez y D. J. M. C. Sánchez, [2017], “Análisis de cuencos de disipación : Estudio experimental de la estructura normalizada Lyapin”, Proyecto Final de Carrera. Universidad Politécnica de Cartagena.
3. R. F. McGhin, R. H. Hotchkiss y E. Kern, [2018], “Submerged Hydraulic Jump Remediation at Low-Head Dams: Partial Width Deflector Design”. *Journal of Hydraulic Engineering*, **144** (12), 04018074.
4. B. A. Tschantz y K. R. Wright, [2011], “Hidden Dangers and Public Safety at Low-head Dams”. *The Journal of Dam Safety*, **9** (1), 8-17.
5. G. M. Kondolf y col., [2014], “Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents”. *Earth’s Future*, **2** (5), 256-280.
6. R. F. McGhin, [2016], “Submerged Jump Remediation at Low-Head Dams: The Multiple Staggered Deflector Design”.
7. T. Hollingshead, [2015], “Small dams: Look harmless, can be fatal”.
8. T. L. Wahl y C. D. Svoboda, [2023], “A Spreadsheet Tool for Defining Dangerous Flow Ranges of Low-Head Dams”. *Water*, **15** (6), 1032.
9. C. N. Fraser, [2016], “Ski-jump energy dissipation. Design of a ski-jump to maximise energy dissipation and aeration”, Final Thesis. University of Stellenbosch.
10. S. Estrella Toral y col., [2011], “Aliviaderos Escalonados sin Cajeros Laterales: Proyecto ALIVESCA”, Instituto FLUMEN-UPC.
11. OpenchannelFlow, [2011], “*Cutthroat Flume User’s Manual*”, 3th ed.
12. J. Alfaro, [2001], “Medidas del agua en canales por medio del aforador sin cuello”, Utah water research laboratory. Utah State University.
13. C. S. James, [2020], “*Hydraulic Structures*”, Springer.
14. V. T. Chow, [1959], “*Open-Channel Hydraulics*”, Blackburn Press, Caldwell (EEUU).



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Apéndices

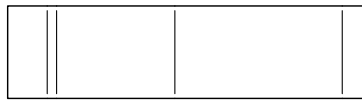


UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

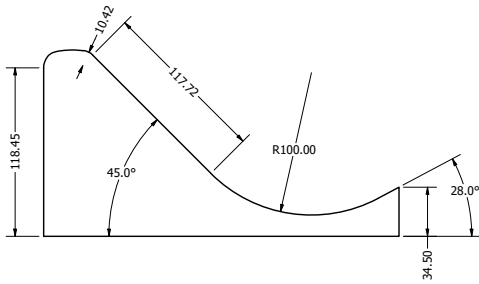


APÉNDICE A

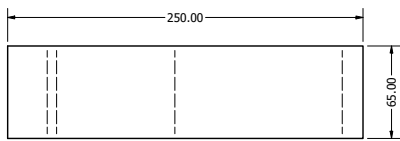
Diseños CAD de las diferentes geometrías



TOP
SCALE 1 / 2



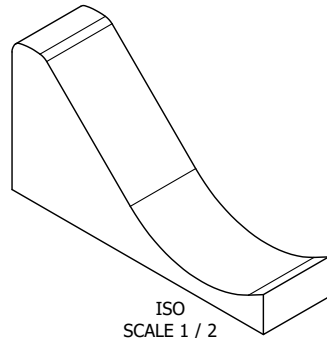
FRONT
SCALE 1 / 2



BOTTOM
SCALE 1 / 2

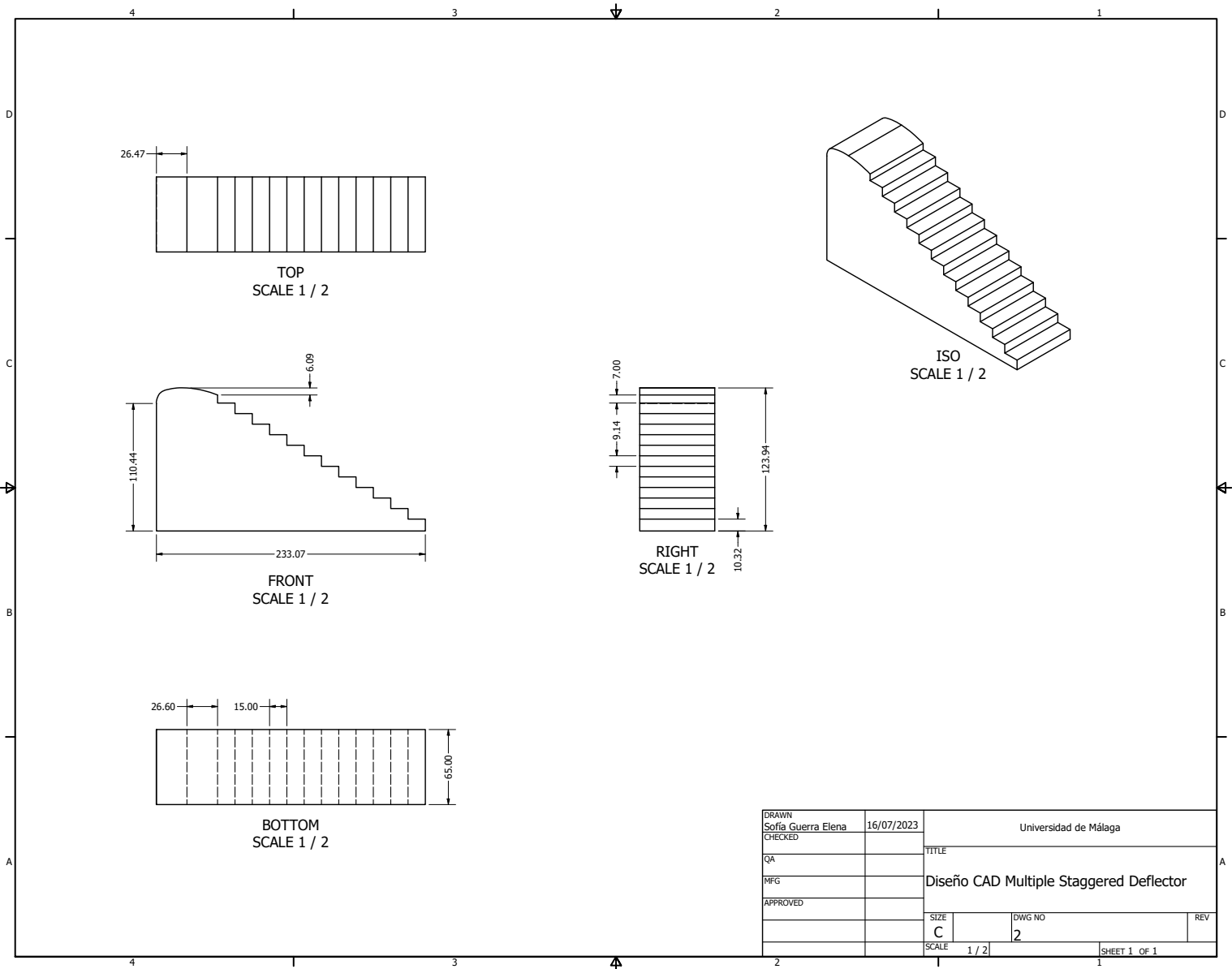


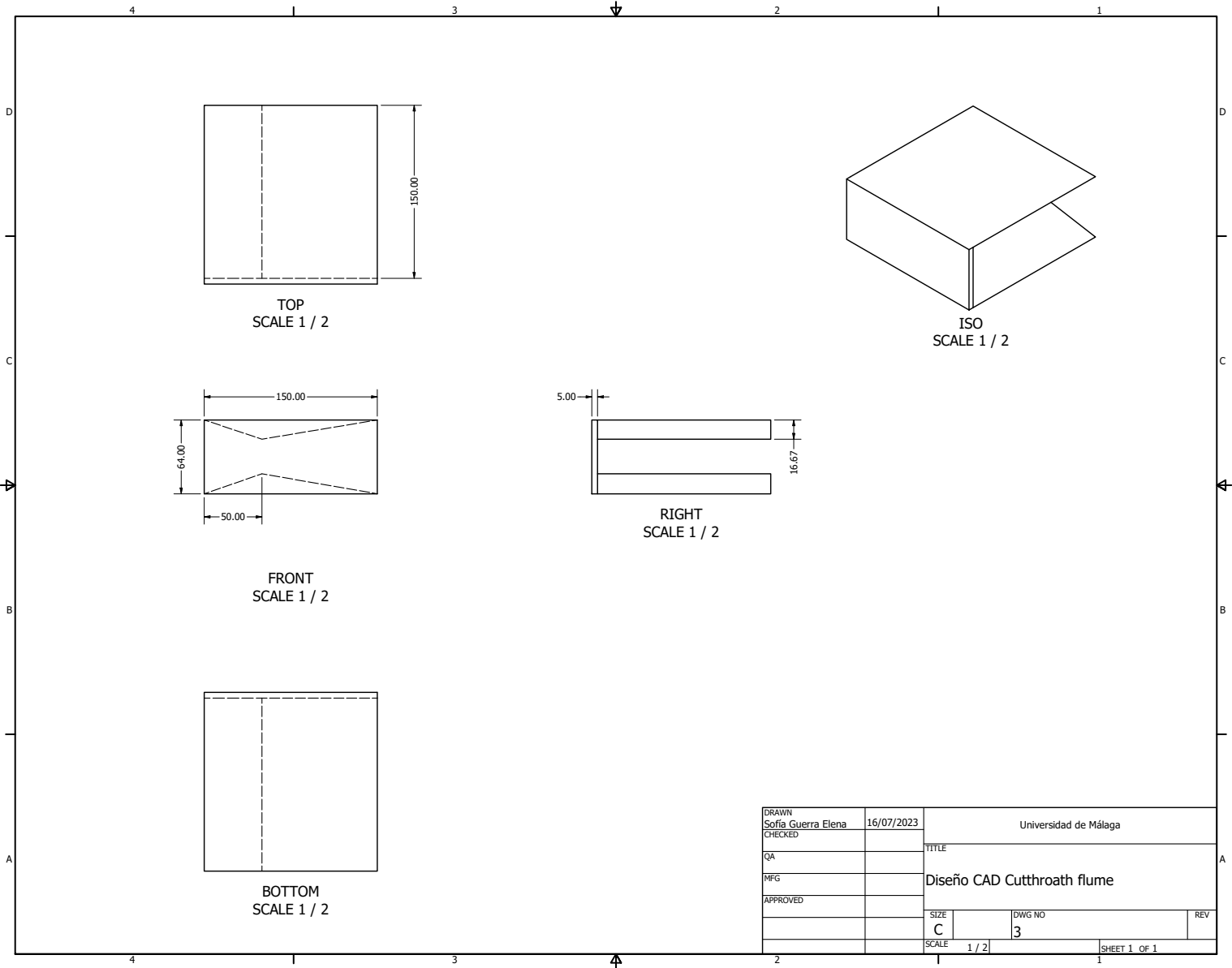
RIGHT
SCALE 1 / 2



ISO
SCALE 1 / 2

DRAWN Sofía Guerra Elena	16/07/2023	Universidad de Málaga		
CHECKED		TITLE		
QA		Diseño CAD Ski Jump		
MFG		SIZE C	DWG NO 1	REV
APPROVED		SCALE 1 / 2	SHEET 1 OF 1	





DRAWN Sofía Guerra Elena	16/07/2023	Universidad de Málaga		
CHECKED		TITLE		
QA		Diseño CAD Cutthroat flume		
MFG		SIZE	DWG NO	REV
APPROVED		C	3	
		SCALE	1 / 2	SHEET 1 OF 1



APÉNDICE B

Códigos Matlab



```
% This script extract all frames from a video file. Is the "short" version
% of the script "extract_frame.m".

clc; clear all; close all;

% Select the video file to read from a dialog box:

[FileName,PathName] = uigetfile('video.mp4','C:\Users\Usuario\Downloads\video.mp4');
file = fullfile(PathName,FileName);

mov = VideoReader(file);
% info=get(mov); % Don't put ";" in order to see video file parameters.

% Output folder for extracted frames:

[~, baseFileName, extentions] = fileparts(FileName);

% Make up a special new output subfolder for all the separate
% movie frames that we're going to extract and save to disk.

folder = pwd; % Make it a subfolder of the folder where this m-file lives.
outputFolder = sprintf('%s/frames_%s',folder, baseFileName);

% Create the folder if it doesn't exist already:

if ~exist(outputFolder, 'dir')
    mkdir(outputFolder);
end

% Getting nº of frames:

numberOfFrames = mov.NumberOfFrames;

% Loop for frames extraction:

numberOfFramesWritten = 0;
for frame = 1 : numberOfFrames

    thisFrame = read(mov, frame);
    outputBaseFileName = sprintf('%3.3d.jpg', frame);
    outputFullFileName = fullfile(outputFolder, outputBaseFileName);
    imwrite(thisFrame, outputFullFileName, 'jpg'); % Try other image file formats.
    progressIndication = sprintf('Frame %4d of %d.', frame,numberOfFrames);
    disp(progressIndication);
    numberOfFramesWritten = numberOfFramesWritten + 1;
end

% Progress indicator:

progressIndication = sprintf(' %d frames to folder
"%s"',numberOfFramesWritten,outputFolder);
disp(progressIndication);

% END Published with MATLAB® R2018b
```



```
% Tracking multiple events in a video:
% -----

clear variables
close all hidden
warning('off','all'); % To avoid very annoying unnecessary warnings messages.

% Firstly, locate the video frames in dir.

files_in_dir = dir('*.jpg');

n_imag = length(files_in_dir);

% Video FPS:

fps=60;

% px/cm ratio for measures:

length = 30.5; % px in 1cm.
ratio = 1/length;

% Then, load an image and take it as reference for zoom in and select
% a suitable POI.

% Showing the reference image for UPSTREAM:

R=imread('100.jpg');

T=graythresh(R);
gR = R(:,:,1);
PR=imbinarize(gR,T);

figure(1)
[up, sq1] = imcrop(PR); axis on; grid on; grid minor;
close(1)

figure(2)
imshow(up);
axis on; grid on; grid minor;
% Point 1:
[x01,y01]=ginput(1);
x1 = x01 + sq1(1);
y1 = y01 + sq1(2);
% Point 2:
x2 = x1 + 30;
y2 = y1;
close(2)

% Showing the reference image for DOWNSTREAM:

R=imread('244.jpg');

T=graythresh(R);
gR = R(:,:,1);
PR=imbinarize(gR,T);
```



```
figure(3)
[down, sq2] = imcrop(PR); axis on; grid on; grid minor;
close(3)

figure(4)
imshow(down);
axis on; grid on; grid minor;
% Point 3:
[x03,y03]=ginput(1);
x3 = x03 + sq2(1);
y3 = y03 + sq2(2);
% Point 4:
x4 = x3 + 30;
y4 = y3;
close(4)

% Vectorization by mean of preallocation:

I1=zeros(size(i));
I2=zeros(size(i));
I3=zeros(size(i));
I4=zeros(size(i));

% Main Loop:

numberOfFramesProcessed = 0; % Counter at 0.

for i = 1:n_imag
    A = imread(files_in_dir(i).name);
    A = A(:,:,1);
    Abw=imbinarize(A,T);
    imshow(Abw); axis on; grid on; hold on;
    plot(x1,y1,'or','MarkerFaceColor','r')
    plot(x2,y2,'ob','MarkerFaceColor','b')
    plot(x3,y3,'og','MarkerFaceColor','g')
    plot(x4,y4,'oy','MarkerFaceColor','y')
    hold off
    drawnow
    A1=Abw(round(y1),round(x1));
    A2=Abw(round(y2),round(x2));
    A3=Abw(round(y3),round(x3));
    A4=Abw(round(y4),round(x4));

    I1(i)=A1;
    I2(i)=A2;
    I3(i)=A3;
    I4(i)=A4;

    % Progress indicator:
    progress = sprintf('Frame Processed %4d of %d.',i,n_imag);
    disp(progress);
    numberOfFramesProcessed = numberOfFramesProcessed + 1;
end

% Final plot for each event:
```



```
t=0:1/fps:(n_imag-1)*(1/fps); % Video recorded at fps frames per second.
figure(2)
plot(t,I1,'r',t,I2,'b',t,I3,'g',t,I4,'y'); grid on;
xlabel('t(s)');ylabel('Color Intensity');
legend('Point 1','Point 2','Point 3','Point 4');

warning('on','all'); % To restore warnings mode again.

% Computing the velocity:

i1 = find(I1 == 0);
i2 = find(I2 == 0);
i3 = find(I3 == 0);
i4 = find(I4 == 0);

v_up = (x2-x1)*ratio/(t(i2(1))-t(i1(1))); % Upstream velocity (cm/s).
v_down = (x4-x3)*ratio/(t(i4(1))-t(i3(1))); % Downstream velocity (cm/s).

message = ['v_upstream = ',num2str(v_up),'(cm/s) and v_downstream = ',
num2str(v_down),'(cm/s)'];
disp(message)

% END Published with MATLAB® R2018b
```



```
% Averaging an image series:

ficheros_en_dir = dir('*.jpg');
A=imread(ficheros_en_dir(1).name);
A=rgb2gray(A);
% imshow(A)
% pause
Amean = zeros(size(A));
n = length(ficheros_en_dir);
for i=1:n
    A=imread(ficheros_en_dir(i).name);
    A=im2gray(A);
    Amean = Amean + double(A);
    %imwrite(A,['imagenBW/',ficheros_en_dir(i).name],'TIFF');
end
Amean = uint8(round(Amean/n));
%Z=[Amean;flipud(Amean)];
%imshow(Z);hold on;
imshow(Amean); hold on;
%imwrite(Z,'Average.jpg','jpg'); Published with MATLAB® R2018b
```