



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES**

**Elaboración del modelo físico y la guía metodológica
para el ensayo de resalto hidráulico de la asignatura
mecánica de fluidos de la Universidad del Azuay**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL CON MENCIÓN EN GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES**

AUTORES:

**FABIÁN DAVID SERRANO BAJAÑA
JORGE ANDRÉS HALES KUSANOVIC**

DIRECTOR:

JOSUÉ LARRIVA VÁSQUEZ

CUENCA – ECUADOR

2018

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico con el más profundo amor a todas las personas que supieron estar ahí por mí cuando lo necesité y gracias a cuyo apoyo y cariño he podido llegar hasta aquí. Sepan que dedicaré mi vida a encontrar la manera de devolverles todo lo que ustedes me han brindado.

A mi mamá Alexandra; por ser la compañía constante en todo momento y en cualquier sentido que necesité, por su amor eterno, paciencia, y por todas las palabras de aliento en los momentos más difíciles. Es certero que gracias a ella he podido cumplir esta meta y ser quien soy ahora.

A mi papá Fabián; por todos sus consejos e incontables enseñanzas de vida, por su ímpetu al impulsarme ser mejor en todos los aspectos de mi persona, por su guía y apoyo en los momentos en los que más necesité. Anhele poder llegar a convertirme en un hombre como él.

A mi novia Camila; por ser mi alegría y apoyo incondicional en esta vida universitaria, por enseñarme a amar de la manera más pura y bella, por vivir junto a mí los mejores y más inolvidables momentos, y por brindarme un amor y lealtad incomparables. Que nos deparen muchas aventuras juntos, hoy y siempre.

A mi hermano Santiago; por haber compartido tantos momentos inolvidables y llenos de alegría desde pequeños, por ser un excelente hermano, y por ser mi primer y mejor amigo. Espero que sus metas se cumplan y poder formar una parte fundamental de ellas como él es de las mías.

A mi hermana Ariana; por ser la mejor amiga y hermana que pude imaginar, por todas las memorias y alegrías compartidas, y por el futuro profesional que nos depara como futuros colegas. Espero poder crecer profesional y humanamente juntos.

A mis abuelas Violeta y Edith; a mis tíos María Rosa, Luis, Patricia, Rosalina y Fernando; y a Flora; por ser los pilares de mi familia y de mi vida, por inculcarme la más grande ética y moral, por brindarme un amor y fuerza incalculables, y por ser fundamentales en mi formación académica, tanto como humana.

A mi familia y amigos; por compartir conmigo las mejores alegrías, sonrisas, y recuerdos inolvidables, y por tener la lealtad y amistad más grande y única que una persona puede desear. Estoy seguro que nuestro cariño y aprecio será eterno, y que seremos profesionales y personas de excelencia siempre.

Fabián David Serrano Bajaña

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado quiero dedicar a todos mis seres queridos que me acompañaron incondicionalmente a lo largo de esta etapa; en especial quiero mencionar a mi padre ya que su apoyo y palabras de aliento fueron indispensables para culminar con éxito mi carrera.

Jorge Andrés Hales Kusanovic

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por darme vida, por haberme brindado la oportunidad de terminar mi carrera profesional y permitirme hoy escribir estas palabras. Espero poder cumplir la misión que tiene planeada para mi vida.

A mis padres Alexandra y Fabián; gracias por creer en mí y apoyarme durante toda mi vida, por haberme inculcado la importancia de los valores como la humildad, respeto y trabajo duro; por todos sus sabios consejos, y por ser el mejor ejemplo y los mejores padres que pudiese desear.

A la Universidad del Azuay, a mis profesores y compañeros, por haber formado parte de mi formación académica y humana. Espero que con sus enseñanzas, conocimiento y amistad logre convertirme en un gran profesional y persona.

Fabián David Serrano Bajaña

Quiero agradecer a la Universidad del Azuay por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de cumplir mis sueños.

A todos los profesores de la carrera que me transmitieron sus conocimientos, experiencias y consejos; buscando formarme como un profesional apto y ético.

Por último a todos mis compañeros y ahora colegas, cuya ayuda y apoyo fue fundamental para poder avanzar a lo largo de esta difícil pero gratificante carrera.

Jorge Andrés Hales Kusanovic

Queremos agradecer de manera especial a nuestro director de tesis Ing. Josué Larriva por darnos la oportunidad de realizar este trabajo de graduación bajo su tutela brindándonos su ayuda incondicional y conocimiento en todo momento. Al Ing. Juan Carlos Malo y a la Ing. Belén Arévalo por formar parte de nuestro tribunal, por guiarnos en la realización de nuestro proyecto y por sus grandes consejos en todo momento para lograr el mejor desempeño posible. Al Ing. José Vázquez por su guía durante nuestra carrera y por darnos la oportunidad de realizar este proyecto para la optimización y mejoría de nuestra carrera. Esperamos haber logrado nuestro objetivo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
PRELIMINARES.....	1
1. Introducción.....	1
2. Problemática.....	2
3. Justificación.....	2
4. Objetivo general.....	3
5. Objetivos específicos.....	3
6. Alcances y resultados.....	3
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1 Conceptos básicos del resalto hidráulico.....	4
1.1.1 Flujo en canales abiertos.....	4
1.1.2 Definición de resalto hidráulico.....	6
1.1.3 Aplicaciones del resalto hidráulico.....	6
1.1.4 Ecuación general del resalto hidráulico.....	7
1.1.5 Tipos de resalto hidráulico.....	8
1.1.6 Longitud del resalto hidráulico.....	10
1.1.7 Pérdida de energía en el resalto hidráulico.....	11
1.1.8 Eficiencia del resalto hidráulico.....	12
1.1.9 Altura del resalto hidráulico.....	12
1.1.10 Resalto hidráulico mediante obstáculos.....	12

1.1.11 Fórmulas y simbología del experimento	14
1.2 Guías metodológicas	16
1.2.1 Concepto.....	16
1.2.2 Partes	16
1.2.3 Objetivos	16
1.2.4 Descripción.....	16
1.2.5 Equipos y herramientas	17
1.2.6 Fórmulas	17
1.2.7 Procedimiento.....	17
1.2.8 Ficha de recolección de datos y ficha de resultados.....	17
1.2.9 Cuestionario.....	17
CAPÍTULO II. DISEÑO DEL EXPERIMENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO	18
2.1 Objetivo	18
2.2 Determinación de variables dependientes e independientes	18
2.3 Determinación de situaciones a analizar	18
2.4 Diseño geométrico del modelo	19
2.4.1 Pre dimensionamiento	19
2.4.2 Cálculos	19
2.5 Construcción del modelo físico	21
2.5.1 Canal.....	22
2.5.2 Tanque de reserva.....	30
2.5.3 Probeta.....	33
2.5.4 Sistema de circulación.....	34
2.5.5 Estructura metálica	43
2.6 Validación del modelo.....	47
CAPÍTULO III. ELABORACIÓN DE LA GUÍA METODOLÓGICA.....	56
OBJETIVO GENERAL	56

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	56
DESCRIPCIÓN	56
EQUIPO Y HERRAMIENTAS	57
FÓRMULAS	60
PROCEDIMIENTO	72
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS	83
FICHA DE RESULTADOS	84
CUESTIONARIO	85
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Resalto hidráulico en sus diferentes secciones	6
Figura 1.2 Tipos de resalto hidráulico por su posición de acuerdo a su posición normal.....	9
Figura 1.3 Diagrama de curvas de relaciones entre $F1$, h/y_1 y X/h' para un vertedero delgado	13
Figura 2.1 Modelo físico con sus partes más importantes	21
Figura 2.2 Canal del modelo	22
Figura 2.3 Canal del modelo físico y sus partes.....	22
Figura 2.4 Plancha de vidrio de 6 mm.....	23
Figura 2.5 Perfil "L" de aluminio	23
Figura 2.6 Vinil blanco de puerta corrediza	23
Figura 2.7 Silicón para vidrios	24
Figura 2.8 Sellos para medidas.....	24
Figura 2.9 Tubo de aluminio rectangular	24
Figura 2.10 Perfil "U" de aluminio	25
Figura 2.11 Diseño del canal del modelo físico	25
Figura 2.12 División de plancha de vidrio	26
Figura 2.13 Piezas de vidrio del canal.....	26
Figura 2.14 Diseño y modelo físico de los sellos de medidas.....	27
Figura 2.15 Diseño y modelo físico de compuerta de paso.....	27
Figura 2.16 Indicación de apertura de 3 cm en la compuerta.....	28
Figura 2.17 Diseño y modelo físico de los obstáculos de vidrio.....	29
Figura 2.18 Zona de posición de obstáculos	29
Figura 2.19 Diseño y modelo físico de los soportes de aluminio.....	30
Figura 2.20 Tanque de reserva del modelo	30
Figura 2.21 Plancha de metal galvanizado	31
Figura 2.22 Tubo de aluminio rectangular	31
Figura 2.23 Tubo circular de metal estructural	31
Figura 2.24 Diseño y modelo físico del tanque de reserva	32
Figura 2.25 Probeta del modelo	33
Figura 2.26 Plancha de metal galvanizado	33
Figura 2.27 Diseño y modelo físico de probeta.....	34

Figura 2.28 Sistema de circulación del agua del modelo	35
Figura 2.29 Bomba de agua centrífuga eléctrica de 2HP y sus características	35
Figura 2.30 Neplo perdido de polipropileno (2")	36
Figura 2.31 Unión de polipropileno (2")	36
Figura 2.32 Neplo de polipropileno (2" x 15 cm)	36
Figura 2.33 Adaptador macho de presión PVC (50 mm x 1 ½")	37
Figura 2.34 Tee de polipropileno (2")	37
Figura 2.35 Bushing de polipropileno (2" x 1 ½")	37
Figura 2.36 Buge PVC (63 mm x 50 mm)	38
Figura 2.37 Adaptador hembra de presión PVC (63 mm x 2")	38
Figura 2.38 Adaptador flex PVC (2")	38
Figura 2.39 Válvula check de pie de bronce (2")	39
Figura 2.40 Codo PVC para desagüe espiga-campana (50 mm)	39
Figura 2.41 Tubo PVC para desagüe espiga-campana (50 mm x 3.00 m)	39
Figura 2.42 Válvula esfera PVC (2")	40
Figura 2.43 Pega para tubos de PVC	40
Figura 2.44 Cinta de teflón	40
Figura 2.45 Elementos de unión del sistema de circulación	41
Figura 2.46 Partes del sistema de circulación de agua del modelo	42
Figura 2.47 Válvula 1 cerrada (regulable) y válvula 2 abierta (fija)	43
Figura 2.48 Estructura metálica del modelo	43
Figura 2.49 Plancha de metal galvanizado	44
Figura 2.50 Tubo estructural de metal galvanizado cuadrado	44
Figura 2.51 Rueda	44
Figura 2.52 Tubos estructurales del esqueleto del modelo físico	45
Figura 2.53 Diseño de la estructura metálica	46
Figura 2.54 Rueda en la base de un tubo estructural (Columna)	46
Figura 2.55 Mecanismo de apertura de la compuerta de paso	47
Figura 3.1 Modelo físico y sus partes más relevantes	57
Figura 3.2 Cronómetro	58
Figura 3.3 Marcador	58
Figura 3.4 Cinta métrica	58
Figura 3.5 Probeta	59
Figura 3.6 Obstáculos de vidrio	59

Figura 3.7 Calculadora	59
Figura 3.8 Diagrama de curvas de relaciones entre $F1$, $h/y1$ y X/h' para un vertedero delgado	70
Figura 3.9 Abastecimiento de agua del tanque de reserva hasta 10 cm de su altura total.....	72
Figura 3.10 Conexión eléctrica del cable de la bomba.....	72
Figura 3.11 Regulación de altura de compuerta estabilizadora de caudal	73
Figura 3.12 Indicación de apertura de 3 cm en la compuerta.....	73
Figura 3.13 Encendido del interruptor de bomba centrífuga.....	74
Figura 3.14 Válvula 1 cerrada en posición 1 y válvula 2 abierta (posición fija)...	74
Figura 3.15 Altura de columna de agua estable antes de compuerta	75
Figura 3.16 Toma de tiempo en que la probeta se llena de agua	75
Figura 3.17 Colocación del obstáculo de menor medida al final del canal.....	75
Figura 3.18 Resalto hidráulico libre con su borde dibujado con marcador.....	76
Figura 3.19 Resalto hidráulico sumergido en la compuerta.....	76
Figura 3.20 Medición de $y1$ y $y2$ por medio de los sellos de medición	76
Figura 3.21 Medición de h' por medio de los sellos de medición.....	77
Figura 3.22 Medición de L por medio de la cinta métrica	77
Figura 3.23 Medición de X por medio de la cinta métrica.....	77
Figura 3.24 Reemplazo del obstáculo analizado por el que le sigue en medida ...	78
Figura 3.25 Válvula 1 en posición 2.....	78
Figura 3.26 Ficha de recolección de datos	83
Figura 3.27 Ficha de resultados.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tipo de régimen de acuerdo al Número de Reynolds	4
Tabla 1.2 Tipo de flujo de acuerdo al Número de Froude	4
Tabla 1.3 Tipos de resalto hidráulico de acuerdo a su Número de Froude	10
Tabla 1.4 Fórmulas para calcular la longitud del resalto hidráulico	11
Tabla 2.1 Resaltos hidráulicos libres y sumergidos	48
Tabla 2.2 Obstáculos utilizados en la práctica y el porcentaje de veces en que produjeron resaltos hidráulicos libres.....	48
Tabla 2.3 Rango de valores de términos más relevantes de la práctica	49
Tabla 2.4 Tipos de resaltos hidráulicos y su porcentaje.....	51
Tabla 2.5 Fórmulas de la longitud del resalto hidráulico utilizadas y su porcentaje en cuando fueron las más certeras	52
Tabla 2.6 Tipos de resalto producidos en la práctica con sus respectivos caudales y valores de y_1	54
Tabla 2.7. Rangos de caudales teóricos que generan diferentes tipos de resalto usando los valores de y_1 producidos en la práctica.	54
Tabla 2.8 Rangos de caudales que se pueden dar en la práctica con los tipos de resalto hidráulico que se generarían en cada uno	55

ÍNDICE DE ANEXOS

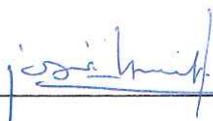
Anexo 1 Ficha de resultados de práctica ejemplo (Parte 1)	91
Anexo 2 Ficha de resultados de práctica ejemplo (Parte 2)	92
Anexo 3 Ficha de resultados de práctica ejemplo (Parte 3)	92

**“ELABORACIÓN DEL MODELO FÍSICO Y LA GUÍA METODOLÓGICA
PARA EL ENSAYO DE RESALTO HIDRÁULICO DE LA ASIGNATURA
MECÁNICA DE FLUIDOS DE LA UNIVERSIDAD DEL AZUAY”**

RESUMEN

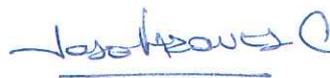
En el presente trabajo se elaboró el modelo físico y la guía metodológica para la práctica de resalto hidráulico de la asignatura de mecánica de fluidos. El modelo físico elaborado tiene la capacidad de generar varios tipos de resaltos, debido a que se puede manipular, a gusto del operador, el caudal, altura del obstáculo colocado en el final del canal y la apertura de la compuerta. Permitiendo así estudiar las particularidades de cada uno de los mismos. La guía metodológica describe la secuencia de pasos que se debe seguir para realizar la práctica, e incluye el modelo de ficha de resultados para el registro y tabulación de los valores obtenidos.

Palabras clave: Resalto hidráulico, guía metodológica, compuerta, obstáculo.



Ing. Josué Bernardo Larriva V. Dr C.

Director del Trabajo de Titulación

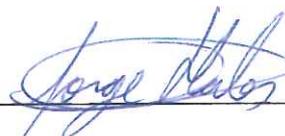


Ing. José Fernando Vázquez C. M.Sc.

Director de la Escuela



Fabian David Serrano Bajaña



Jorge Andrés Hales Kusanovic

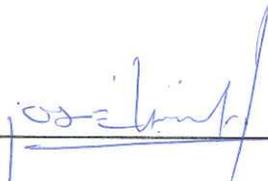
Autores

**“ELABORATION OF THE PHYSICAL MODEL AND THE
METHODOLOGICAL GUIDE FOR THE HYDRAULIC JUMP PRACTICE
OF THE FLUID MECHANICS SUBJECT OF THE UNIVERSITY OF
AZUAY”**

ABSTRACT

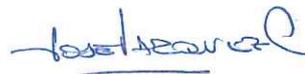
In this work, the physical model and the methodological guide for the practice of hydraulic jump of the fluid mechanics subject were developed. The elaborated model had the capacity to generate several types of hydraulic jumps because it was possible to manipulate the flow, the height of the obstacle placed at the end of the channel and the opening of the gate. This allowed studying the particularities of each of these. The methodological guides described the sequence of steps to be followed in order to carry out this practice and included the results form to record and tabulate the obtained values.

Keywords: Hydraulic jump, methodological guide, gate, obstacle.



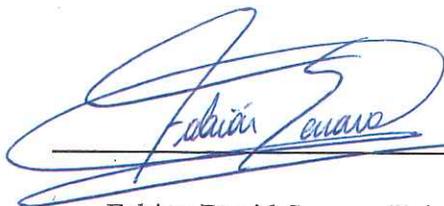
Ing. Josué Bernardo Larriva V. Dr C.

Thesis Director



Ing. José Fernando Vázquez C. M.Sc.

Faculty Director



Fabian David Serrano Bajaña



Jorge Andrés Hales Kusanovic

Authors



Translated by
Ing. Paul Arpi

Serrano Bajaña Fabián David

Hales Kusanovic Jorge Andrés

Trabajo de Titulación

Ing. Josué Bernardo Larriva Vásquez, M. Sc.

Septiembre, 2018.

**ELABORACIÓN DEL MODELO FÍSICO Y LA GUÍA METODOLÓGICA
PARA EL ENSAYO DE RESALTO HIDRÁULICO DE LA ASIGNATURA
MECÁNICA DE FLUIDOS DE LA UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

PRELIMINARES

1. Introducción

Resulta necesario destacar la importancia y el rol fundamental que juega el agua en el desarrollo de la vida en nuestro planeta. En este contexto, se ha tratado de entender y manejar de la manera más óptima este recurso.

Hace varios miles de años atrás, el hombre empezó a utilizar los canales con la finalidad de captar el agua y trasladarla a algún lugar específico. Debido a esto, surgió la necesidad de entender el origen, comprender el comportamiento e intentar manejar un sin número de fenómenos que se generan por el movimiento del agua a través de estos canales, entre ellos el conocido resalto hidráulico.

En este trabajo de titulación se pretende hacer un estudio completo, sobre el origen y particularidades del resalto hidráulico; para luego diseñar y construir un modelo físico que permitirá modelar este fenómeno en el laboratorio de hidráulica de la Universidad del Azuay.

Por último, se propondrá una guía metodología y un modelo de ficha de resultados para que otros estudiantes puedan hacer uso del modelo físico ya construido, con el objetivo de que se refuercen los conocimientos impartidos previamente en las aulas de clase.

2. Problemática

Debido a las características propias de la Ingeniería Civil, la mayoría de las veces la teoría impartida en las cátedras a los estudiantes no es suficiente para comprender a cabalidad un determinado tema. La mecánica de fluidos es una asignatura que encaja con lo mencionado anteriormente, ya que en la misma se estudian una serie de fenómenos que son difíciles de entender y explicar desde el punto de vista netamente teórico.

Debido a esto muchas de las veces, para lograr un entendimiento íntegro de un determinado fenómeno, se recurre a la ejecución de prácticas en el laboratorio por parte de los alumnos.

El problema fundamental surge por el hecho de que todas las prácticas deben ser guiadas por un profesional afín al área de estudio, el cual tendrá la tarea de indicar a los estudiantes como se realizan los ensayos y muchas de las veces se quedará en el laboratorio para atender dudas puntuales mientras los estudiantes llevan a cabo la misma. Otro problema significativo es la inexistencia de modelos físicos para la realización de dichas prácticas y un laboratorio de hidráulica para su almacenamiento y mantenimiento.

3. Justificación

En la mayoría de las materias impartidas en la carrera, las prácticas de laboratorio son un complemento casi imprescindible para lograr el entendimiento íntegro de un determinado fenómeno, el cual la mayoría de las veces se trata con anterioridad en las aulas de clase.

Debido a esto, se propone la elaboración de una guía metodológica para realizar el ensayo de laboratorio relacionado con el estudio del resalto hidráulico.

En la misma se detallará de la manera más simple posible los pasos que se deben seguir para realizar la misma, incluirá ejemplos de cálculo claros y fichas modelo para su ejecución.

Gracias a esto se conseguirá disminuir los problemas que se presentan al momento de ejecutar el ensayo, logrando que el fenómeno estudiado sea entendido a cabalidad por los estudiantes. Y se logrará contribuir al laboratorio de hidráulica de la Universidad del Azuay.

4. Objetivo general

Elaborar el modelo físico y la guía metodológica para el ensayo de resalto hidráulico concerniente a la asignatura de mecánica de fluidos.

5. Objetivos específicos

1. Elaborar el marco teórico del resalto hidráulico.
2. Diseñar y construir el modelo físico.
3. Elaborar la guía metodológica y la ficha de resultados.

6. Alcances y resultados

El presente trabajo de titulación contendrá una descripción detallada, una ficha formato y los cálculos de cada uno de los ensayos realizados en laboratorio concernientes a la asignatura de hidráulica; para lo cual será necesario:

- Construir una maqueta en la que se represente y se pueda calcular un resalto hidráulico.
- Realizar ensayos con diferentes caudales y determinar las características correspondientes del resalto que se produce en cada uno de ellos.
- Crear un cuadro de resultados en el que se presenten los diferentes resultados de cada uno de los ensayos efectuados.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Conceptos básicos del resalto hidráulico

1.1.1 Flujo en canales abiertos

El comportamiento del flujo en un canal abierto depende principalmente de la viscosidad y de la gravedad que se ejercen sobre el mismo. El efecto de la viscosidad está representado por el Número de Reynolds y clasifica al flujo en tres tipos: laminar, turbulento y transicional (Tabla 1.1). El efecto de la gravedad está representado por el Número de Froude y clasifica al flujo en tres tipos: subcrítico, crítico y supercrítico (Tabla 1.2) (Zucarelli & Morresi).

Tabla 1.1 Tipo de régimen de acuerdo al Número de Reynolds

Tipo de régimen	Número de Reynolds
Laminar	$Re < 1000$
Transicional	$1000 < Re < 3000$
Turbulento	$Re > 3000$

Fuente: (Zucarelli & Morresi)

Tabla 1.2 Tipo de flujo de acuerdo al Número de Froude

Tipo de flujo	Número de Froude
Subcrítico	$F < 1$
Crítico	$F = 1$
Supercrítico	$F > 1$

Fuente: (Zucarelli & Morresi)

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu} \quad (1)$$

$$R = \frac{A}{P_m} \quad (2)$$

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (3)$$

$$Q = V \cdot A \quad (4)$$

$$A = y \cdot b \quad (5)$$

$$P_m = b + 2 \cdot y \quad (6)$$

F = Número de Froude

Re = Número de Reynolds

V = Velocidad del agua (m/s)

R = Radio hidráulico (m)

ν = Viscosidad cinemática (m²/s) (En el caso del agua a 20°C es 1.007 X 10⁻⁶ (m²/s))

A = Área transversal del flujo (m²)

P_m = Perímetro mojado (m)

g = Valor de la gravedad (9.81 m/s²)

y = Altura del nivel del agua (m)

Q = Caudal del flujo (m³/s)

b = Ancho del canal (m)

(Zucarelli & Morresi)

1.1.2 Definición de resalto hidráulico

El resalto hidráulico es un fenómeno que es generado en un canal abierto cuando el flujo es rápidamente variado, se produce cuando hay un cambio en la corriente del agua de manera repentina, en donde la misma cambia de un flujo supercrítico a un flujo subcrítico, es decir, cambia de ser un flujo rápido y de poca profundidad a un flujo lento y profundo (Figura 1.1). Este cambio se da de manera brusca, violenta, acompañado por turbulencia y se produce a consecuencia de que se dio una pérdida de energía del flujo a lo largo del canal por efecto de la fricción (Chow, 1994; Macián Pérez, Bayón, Vallés Morán, García Bartua, & López Jiménez, 2017; Manrique Andrade, 2013; Marbello Pérez, 2005).

El resalto hidráulico se produce en un canal aguas arriba y abajo de una compuerta regulable, aguas arriba y abajo de un vertedero, o cuando existe un cambio de pendiente brusco en el mismo (Chow, 1994).

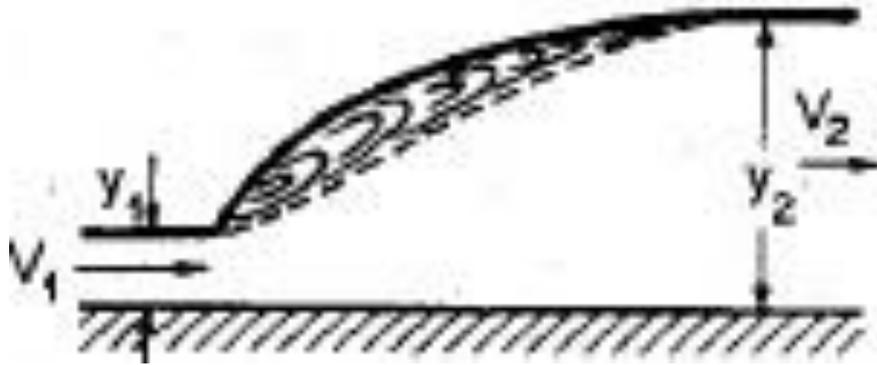


Figura 1.1 Resalto hidráulico en sus diferentes secciones

Fuente: (Chow, 1994)

1.1.3 Aplicaciones del resalto hidráulico

El resalto hidráulico tiene muchas aplicaciones prácticas:

- Disipación de energía en estructuras hidráulicas en donde se desee evitar socavación (presas, vertederos, etc).
- Mantener y/o incrementar los niveles de agua en canales de riego y distribución.
- Remover bolsas de aire en conductos cerrados previniendo su taponamiento por aire.

- Aireación y decoloración del agua para abastecimiento potable.
- Reducción de presión bajo estructuras, mediante elevación del flujo de agua.
- La mezcla de sustancias químicas para la purificación o tratamiento de agua.
- Producción de flujo crítico en una sección de control para que se pueda medir de manera mas efectiva y económica el caudal.
- Aumentar el peso y la altura aguas abajo de una estructura, reduciendo la presión en la parte superior de la estructura.

(Chow, 1994; Manrique Andrade, 2013; Rodríguez Ruiz, 2008)

1.1.4 Ecuación general del resalto hidráulico

La ecuación general de un resalto hidráulico para canales abiertos rectangulares y de poca pendiente es la siguiente:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} * (\sqrt{1+8*(F_1)^2}-1) \quad (7)$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} * (\sqrt{1+8*(F_2)^2}-1) \quad (8)$$

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g*y_1}} \quad (9)$$

$$F_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g*y_2}} \quad (10)$$

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

y_2 = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

F_1 = Número de Froude de la sección 1 (Antes del resalto hidráulico)

F_2 = Número de Froude de la sección 2 (Después del resalto hidráulico)

V_1 = Velocidad del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m/s)

V_2 = Velocidad del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m/s)

g = Valor de la gravedad (9.81 m/s²)

(Chow, 1994; Marbello Pérez, 2005)

1.1.5 Tipos de resalto hidráulico

Existen diferentes maneras de clasificar un resalto hidráulico. La primera de estas es de acuerdo a su posición en el canal respecto a su posición normal (libre, repelido, sumergido). La segunda clasificación es de acuerdo a su Número de Froude (Chow, 1994; Marbello Pérez, 2005).

De acuerdo a su posición el resalto hidráulico puede ser libre, repelido o sumergido (Figura 1.2).

Libre: este tipo de resalto hidráulico se da inmediatamente adelante de la posición y_1 . Este es el caso ideal para un resalto hidráulico que cumple con las condiciones de la fórmula general (Chow, 1994; Marbello Pérez, 2005).

Repelido: este tipo de resalto hidráulico se produce a una distancia aguas abajo de la posición inmediata a y_1 del primer caso. En este caso se produce una altura posterior al resalto y'_2 que es menor a la y_2 que se hubiese dado en el resalto hidráulico libre. A esta nueva altura y'_2 le corresponde una y'_1 que le satisface a la fórmula general y se da antes del resalto (Chow, 1994; Marbello Pérez, 2005).

Sumergido: este tipo de resalto hidráulico se produce a una distancia aguas arriba de la posición inmediata a la del primer caso. En este caso se produce una altura posterior al resalto y'_2 que es mayor a y_2 que se hubiese dado en el resalto hidráulico libre. En esta situación no se puede calcular el valor correspondiente de y'_1 ya que el resalto se encuentra sumergido (Chow, 1994; Marbello Pérez, 2005).

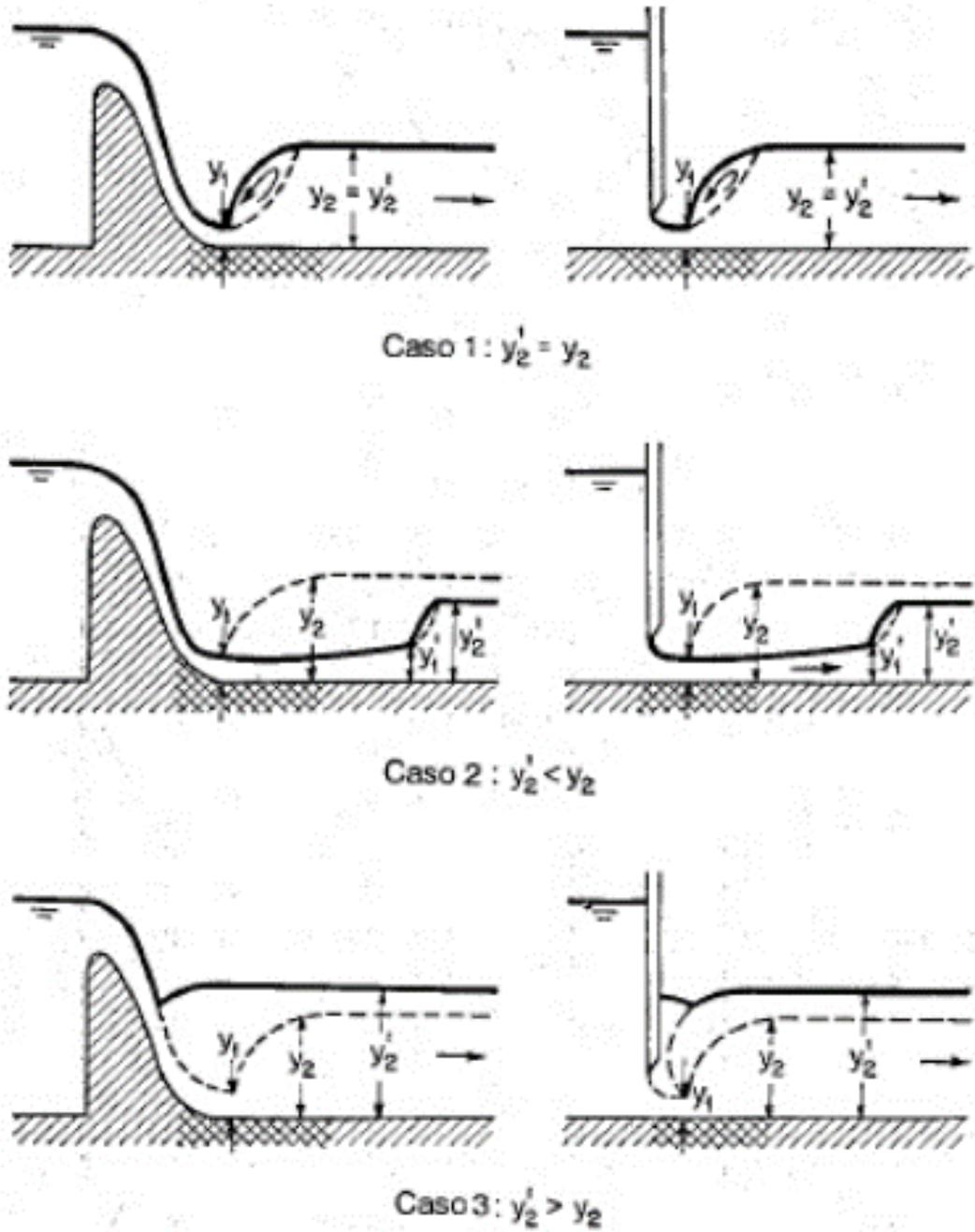


Figura 1.2 Tipos de resalto hidráulico por su posición de acuerdo a su posición normal

Fuente: (Chow, 1994)

Dependiendo del Número de Froude tendremos distintos tipos de resalto hidráulico, los cuales se resumen en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Tipos de resalto hidráulico de acuerdo a su Número de Froude

Valor de F_1	Resalto Hidráulico	Descripción	Energía disipada (%)
$F_1 < 1$	No se da resalto	Flujo es subcrítico.	0
$F_1 = 1$	No se da resalto	Flujo es crítico.	0
$F_1 = 1$ a 1.7	Ondular	Se presentan ondulaciones en la superficie.	< 5
$F_1 = 1.7$ a 2.5	Débil	Pequeños remolinos en resalto, velocidad uniforme.	5 a 15
$F_1 = 2.5$ a 4.5	Oscilante	Chorro oscilante desde el fondo hasta superficie. No tiene ninguna regularidad.	15 a 45
$F_1 = 4.5$ a 9	Estable	Resalto bien balanceado, mejor comportamiento Brusco y de alta velocidad.	45 a 70
$F_1 > 9$	Fuerte	Puede soportar superficies rugosas.	70 a 85

Fuente: (Chow, 1994; Marbello Pérez, 2005)

1.1.6 Longitud del resalto hidráulico

La longitud del resalto hidráulico se define como la distancia desde la primera cara del resalto hasta un punto de la superficie en el que el remolino termina y se estabiliza el flujo. La longitud del resalto hidráulico ha sido tema de grandes investigaciones por varios científicos, los cuales han llegado a tener conclusiones que varían desde fórmulas específicas o generales hasta curvas que dependen de varios factores para determinar dicha longitud (Chow, 1994; Manrique Andrade, 2013).

Las principales fórmulas para calcular la longitud del resalto hidráulico en canales rectangulares se muestran en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Fórmulas para calcular la longitud del resalto hidráulico

Fórmula	Autor	País
$L_1=6*(y_2-y_1)$ (11)	Smetana	República Checa
$L_2=5.9*(y_1*F_1)$ (12)	Safránez	Alemania
$L_3=8.3*y_1*(F_1-1)$ (13)	Einwachter	Alemania
$L_4=(y_2-y_1)*(8-\frac{0.05*y_2}{y_1})$ (14)	Wóycicki	Polonia
$L_5=10.3*y_1*(F_1-1)^{0.81}$ (15)	Chertusov	Rusia
$L_6=6.9*(y_2-y_1)$ (16)	USBR (United States Bureau of Reclamation)	Estados Unidos

Fuente: (Rodríguez Ruiz, 2008)

L_n = Longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula **n** (m)

L = Longitud del resalto hidráulico medido en campo (m)

1.1.7 Pérdida de energía en el resalto hidráulico

En el resalto hidráulico la pérdida de energía se representa como la diferencia de energías específicas entre el punto de inicio del resalto y su punto final (Chow, 1994).

$$E_1 = y_1 + \frac{(V_1)^2}{2*g} \quad (17)$$

$$E_2 = y_2 + \frac{(V_2)^2}{2*g} \quad (18)$$

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (19)$$

ΔE = Pérdida de energía en el resalto hidráulico (m)

E_1 = Energía específica en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

E_2 = Energía específica en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

1.1.8 Eficiencia del resalto hidráulico

La eficiencia de un resalto hidráulico se puede definir como la relación que existe entre la energía específica en el punto en donde termina el resalto y el punto en donde inicia (Chow, 1994).

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{y_2 + \frac{(V_2)^2}{2 \cdot g}}{y_1 + \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g}} \quad (20)$$

E_2/E_1 = Eficiencia del resalto hidráulico

1.1.9 Altura del resalto hidráulico

La altura del resalto hidráulico se define como la diferencia entre las alturas del flujo de agua en el punto en donde finaliza el resalto y el punto en donde inicia (Chow, 1994).

$$hr = y_2 - y_1 \quad (21)$$

hr = Altura del resalto hidráulico (m)

1.1.10 Resalto hidráulico mediante obstáculos

En algunos casos cuando no se produce el resalto hidráulico de manera natural se recurre al uso de obstáculos para asegurar la formación del mismo y controlar la posición en la que se encuentre. Estos obstáculos pueden ser de diferentes tipos; vertederos delgados, vertederos anchos, subidas y descensos fuertes al final del canal (Chow, 1994).

Cuando se utilizan estos obstáculos al final del canal lo que ocurre es que las fuerzas en el obstáculo disminuyen a un mínimo, para posteriormente ir aumentando mientras el resalto se traslada aguas arriba a una posición constante. Esto ocurre debido al cambio de velocidades que se produce en el resalto, lo cual es común cuando se trata de un flujo rápidamente variado (Chow, 1994).

En el caso de un vertedero delgado no se puede utilizar una fórmula analítica exacta para determinar los elementos del resalto, sino que se ha desarrollado un diagrama

(Figura 1.3) que los relaciona siempre y cuando se cumple la condición de la ecuación 22 (Chow, 1994).

$$y_3 < h' - 0.75 \cdot h \quad (22)$$

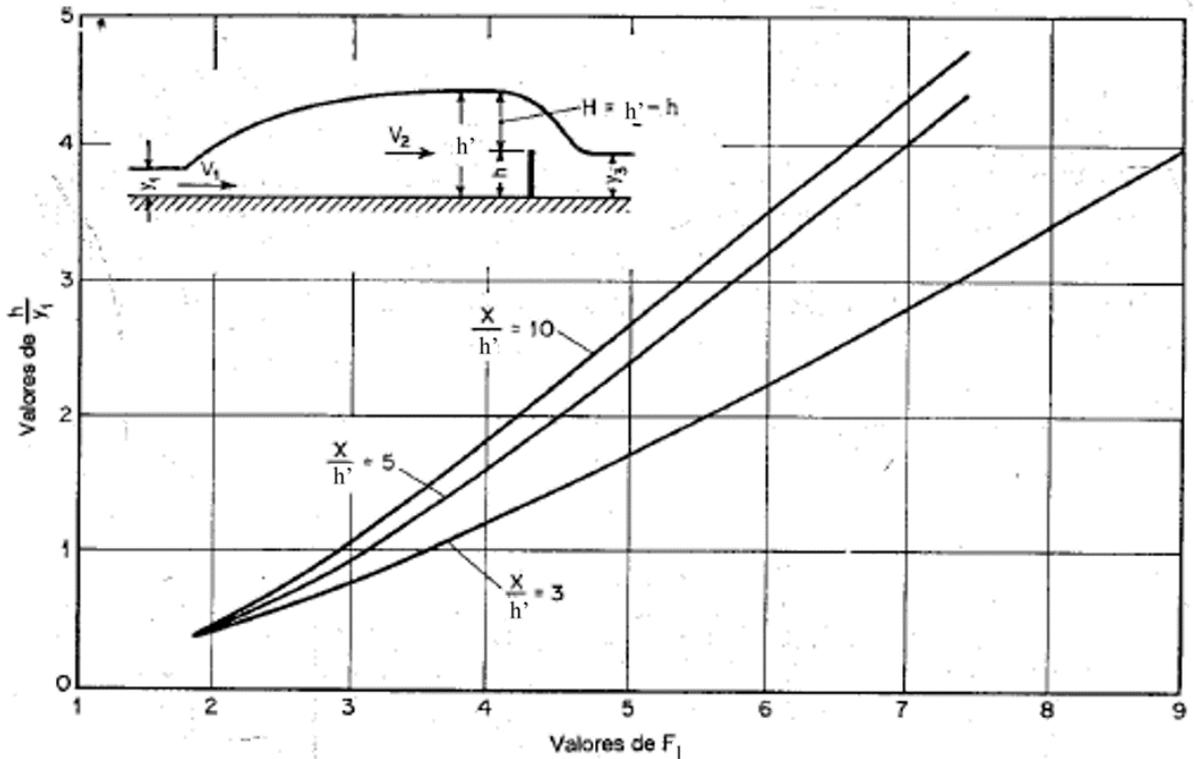


Figura 1.3 Diagrama de curvas de relaciones entre F_1 , h/y_1 y X/h' para un vertedero delgado

Fuente: (Chow, 1994)

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

h' = Altura del nivel del agua en el vertedero (m)

y_3 = Altura del nivel del agua en la sección 3 (Después del vertedero) (m) = 0.00 m

F_1 = Número de Froude de la sección 1 (Antes del resalto hidráulico)

X = Distancia desde el pie del resalto hasta el vertedero (m)

h = Altura del vertedero (obstáculo) (m)

H = Altura del agua que sale expulsada encima del vertedero (m)

(Chow, 1994)

$$H = h' - h \quad (23)$$

En el diagrama se toma un punto de coordenadas tomadas en campo y se grafica pudiendo ocurrir tres posibilidades:

1. Punto dentro de curva: se da el resalto hidráulico.
2. Punto arriba e izquierda de curva: vertedero muy alto, resalto se va aguas arriba y puede desaparecer en fuente.
3. Punto abajo y derecha de curva: vertedero muy bajo, resalto se va aguas abajo y desaparecerá.

(Chow, 1994)

1.1.11 Fórmulas y simbología del experimento

En este punto se describen las fórmulas que se utilizarán en el experimento y que no forman parte del marco teórico del resalto hidráulico.

$$t_p = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} \quad (24)$$

$$Q = \frac{V_p}{t_p} \quad (25)$$

$$y_c = \left(\frac{Q}{b \cdot \sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad (26)$$

$$\Delta L_n = |L_n - L| \quad (27)$$

$$EL = \frac{\Delta L_n}{L_n} * 100 \quad (28)$$

$$\Delta y_2 = |y_2FG - y_2| \quad (29)$$

$$Ey_2 = \frac{\Delta y_2}{y_2FG} * 100 \quad (30)$$

$$\text{Pendiente} = \frac{\text{Altura inicial} - \text{Altura final}}{\text{Longitud horizontal}} * 100 \quad (31)$$

$$a = 0.8 * y_1 \quad (32)$$

$$\text{EQ} = \frac{\text{Q máximo teórico} - \text{Q máximo real}}{\text{Q máximo teórico}} * 100 \quad (33)$$

t_n = Medida de tiempo **n** en que se llena la probeta (s)

t_p = Tiempo promedio en que se llena la probeta (s)

V_p = Volumen de probeta (m^3)

y_c = Altura del nivel del agua cuando el flujo es crítico (m)

ΔL_n = Error absoluto entre la longitud del resalto hidráulico calculada por la fórmula **n** y la medida en campo (m)

EL = Error porcentual entre la longitud del resalto hidráulico medida en campo y la calculada por fórmula que más se le asemeje (%)

y_2FG = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) calculada con la fórmula general del resalto hidráulico (m)

Δy_2 = Error absoluto entre la altura medida y calculada del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

Ey_2 = Error porcentual entre la altura medida y calculada del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (%)

a = Apertura de compuerta (m)

EQ = Error porcentual entre el caudal máximo teórico y el caudal máximo real (%)

1.2 Guías metodológicas

1.2.1 Concepto

Una guía metodológica se puede definir como un instrumento metodológico, el cual contiene procesos educativos, definiciones e instrucciones para desarrollar de la mejor manera una actividad (Cassells Vigil, 2005).

En otras palabras es un conjunto de principios pedagógicos, temas y pasos que deben ser tomados en cuenta en un plan de trabajo. Los mismos pueden ayudar a la persona que la consulta a tomar decisiones correctas respecto a la actividad que se está desarrollando (Cassells Vigil, 2005).

1.2.2 Partes

Una guía metodológica puede estar estructurada de diferentes maneras, las cuales dependerán del tipo de actividad que se desarrollará como también del estilo del autor que las elabore. Sin embargo entre los elementos más importantes que debe poseer tenemos los siguientes:

- Objetivo
- Descripción
- Equipos y herramientas
- Fórmulas
- Procedimiento
- Ficha de recolección de datos y ficha de resultados
- Cuestionario

(Luna Méndez, 2016)

1.2.3 Objetivos

Se explicarán cuáles son los objetivos generales y específicos del ensayo de laboratorio del resalto hidráulico, de tal manera de que las personas encargadas de realizar la práctica, al terminar puedan sacar conclusiones sobre la misma.

1.2.4 Descripción

En la descripción se explicará de manera muy breve la práctica de laboratorio que se realizará, para que los estudiantes tengan una idea previa del procedimiento a seguir.

1.2.5 Equipos y herramientas

En esta parte de la guía metodológica se describirán brevemente los materiales utilizados en esta práctica de laboratorio. En éstos se incluyen los materiales de los que está compuesto el modelo físico, así como los externos a éste que se deban utilizar para la realización del experimento.

1.2.6 Fórmulas

En este punto de la guía se describen todas las fórmulas que se utilizarán en el desarrollo de la práctica de laboratorio para calcular todos los datos necesarios para completarla.

1.2.7 Procedimiento

En el procedimiento se explicará paso por paso cómo proceder al momento de realizar la práctica de laboratorio. Se explicará a detalle cada acción que la persona a cargo de realizar el experimento deba hacer para poder llegar a recrear el resalto hidráulico de manera óptima en el modelo físico.

1.2.8 Ficha de recolección de datos y ficha de resultados

La ficha de recolección de datos es un cuadro en el cual se anotarán todos los datos que en campo al momento de realizar la práctica de laboratorio variarán dependiendo de los aspectos específicos del experimento a realizar.

La ficha de resultados es un cuadro en el cual se pasarán a limpio todos los valores tomados en campo y se calcularán en base a éstos todos los datos necesarios para cumplir los objetivos del experimento.

1.2.9 Cuestionario

El cuestionario consta de varias preguntas de razonamiento destinadas a determinar el grado de entendimiento del estudiante sobre la práctica del resalto hidráulico y para que los mismos analicen los resultados obtenidos y determinen la manera en que se relacionan los diferentes elementos del resalto hidráulico.

CAPÍTULO II. DISEÑO DEL EXPERIMENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO

2.1 Objetivo

El modelo físico que se va diseñar para posteriormente construir, tiene como función principal la de ayudar, tanto a los estudiantes como académicos, a entender las particularidades del resalto hidráulico a través de la ejecución de pruebas, ensayos e investigaciones de laboratorio. Razón por la cual se pretende que la manipulación de este equipo sea sencilla y especialmente segura para los operarios, evitando que se presenten problemas o errores por el manejo de este equipo.

2.2 Determinación de variables dependientes e independientes

Como paso previo para realizar el pre diseño del modelo, se deben determinar las variables independientes y dependientes que serán parte de este procedimiento.

Las variables independientes que intervienen en el diseño son:

- Caudal de circulación: el cual está definido por la potencia y capacidad de la bomba que se llegue a escoger.
- Dimensiones del canal: mismas que serán escogidas en función de la facilidad constructiva y cantidad de material a disposición.
- Altura de compuerta de paso.
- Altura del obstáculo al final del canal.

Las variables dependientes de este procedimiento son alturas del resalto hidráulico, longitudes del resalto hidráulico, velocidades en el flujo, números de Reynolds y Froude en cada sección del canal al inicio y final del resalto hidráulico.

2.3 Determinación de situaciones a analizar

Cuando el modelo físico esté construido, los estudiantes y docentes realizarán simulaciones consiguiendo generar diferentes tipos de resaltos hidráulicos.

Para poder lograr lo anteriormente descrito se dispondrá de una bomba de caudal regulable, una compuerta que controlará el flujo turbulento al inicio del modelo, y obstáculos al final del modelo que provocarán el resalto de manera artificial.

Con esto se logrará probar la maqueta con diferentes caudales generando distintos resaltos, cuyas particularidades y diferencias serán analizadas y estudiadas.

2.4 Diseño geométrico del modelo

Es importante recalcar que la sección de nuestro canal puede ser de varias formas como triangular, circular, cuadrada, etc. Para nuestro caso hemos considerado diseñar y construir un canal rectangular, debido a que todas las fórmulas descritas en el capítulo 1 se basan en resaltos hidráulicos generados en canales de esta naturaleza.

2.4.1 Pre dimensionamiento

Teniendo en cuenta todas las variables que influyen en el pre dimensionamiento del modelo; como es el caso del caudal que ingresará al canal, costo del equipo, facilidades constructivas y de transporte, se ha considerado plantear los siguientes parámetros.

- Q máximo teórico de la bomba escogida : 8 lts/s
- Largo (L): 4 m
- Ancho (B): 0.15 m
- Alto (H): 0.5 m

Así mismo, se dotará al canal de una compuerta cuya altura puede ser regulada a disposición del usuario, la misma estará ubicada a 1 m desde un extremo por lo que la longitud para que se genere el resalto será de 3 metros.

2.4.2 Cálculos

Con las dimensiones tentativas ya adoptadas, para realizar los cálculos debemos restringir ciertos parámetros hidráulicos a un determinado valor, teniendo en cuenta las dimensiones que tendrá nuestro canal.

Para esto consideramos lo siguiente:

- Altura máxima de resalto (y_2): 0.40 m
- Longitud máxima de resalto: 3.00 m

2.4.2.1 Longitud del resalto hidráulico

Con la utilización de la Tabla 1.4 descrita en el primer capítulo y utilizando la fórmula de Smetana tenemos los siguientes cálculos.

$$L = 6*(y_2 - y_1)$$

$$3 = 6*(0.40 - y_1)$$

$$y_1 = 0.10 \text{ m}$$

2.4.2.2 Apertura de la compuerta

Utilizando la fórmula de la apertura de la compuerta descrita en el capítulo 1, tenemos lo siguiente.

$$a = 0.8*y_1$$

$$a = 0.8 * 0.10 \text{ m}$$

$$a = 0.08 \text{ m}$$

2.4.2.3 Velocidad de flujo

La velocidad de flujo se calculó de la siguiente manera:

$$Q_1 = \frac{V_1}{b*y_1}$$

$$0.008 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{V_1}{0.15 \text{ m} * 0.10 \text{ m}}$$

$$0.008 \text{ m}^3/\text{s} * 0.15 \text{ m} * 0.10 \text{ m} = V_1$$

$$V_1 = 0.00012 \text{ m/s}$$

2.4.2.4 Número de Froude

El Número de Froude se calculó de la siguiente manera:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g*y_1}}$$

$$F_1 = \frac{0.00012}{\sqrt{9.81*0.1}}$$

$$F_1 = 0.000121$$

Según la Tabla 1.3 expuesta en el anterior capítulo, en este caso no se generaría un resalto hidráulico en nuestra sección. Con el objetivo de no modificar las dimensiones escogidas de nuestro canal, dotaremos al mismo de topes de diferentes alturas en la parte final del mismo que funcionarán como vertederos de cresta delgada obligando a que el flujo cambie de supercrítico a subcrítico de manera artificial, consiguiendo con esto generar el resalto hidráulico.

2.5 Construcción del modelo físico

La construcción del modelo físico se realizó en diferentes partes, las cuales posteriormente se colocaron juntas para obtener el modelo final (Figura 2.1):

- Canal
- Tanque de reserva
- Probeta
- Sistema de circulación
- Estructura metálica



Figura 2.1 Modelo físico con sus partes más importantes

Fuente: Elaboración propia

2.5.1 Canal

El canal es la parte del modelo físico en donde propiamente se produce el resalto hidráulico (Figura 2.2). Consta de una compuerta estabilizadora de caudal, obstáculos de vidrio que se colocan en el borde final, sellos de medidas en las paredes laterales y soportes de aluminio (Figura 2.3).

En su borde inicial se deposita el agua transportada desde el tanque de reserva para que viaje a través del canal, pase por la compuerta estabilizadora, se produzca el resalto y salga por su borde final donde se encuentra el obstáculo de vidrio para caer nuevamente en el tanque de reserva.



Figura 2.2 Canal del modelo

Fuente: Elaboración propia

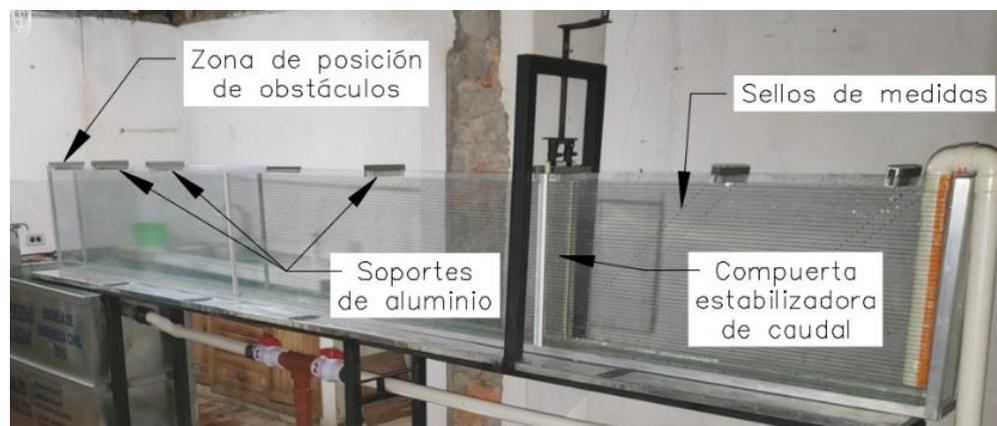


Figura 2.3 Canal del modelo físico y sus partes

Fuente: Elaboración propia

2.5.1.1 Materiales

Los materiales que se utilizaron para la construcción del canal fueron:

- Plancha de vidrio de 6 mm (2.14 m x 3.30 m) (Figura 2.4)

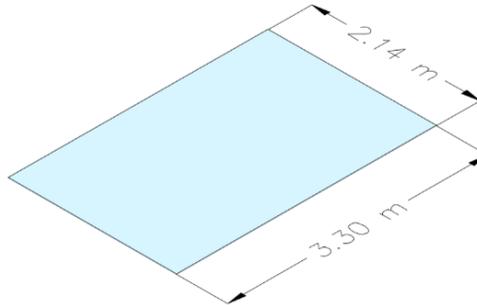


Figura 2.4 Plancha de vidrio de 6 mm

Fuente: Elaboración propia

- Perfil "L" de aluminio (Figura 2.5)



Figura 2.5 Perfil "L" de aluminio

Fuente: <https://www.amazon.es/%C3%81ngulos-aluminio-anodizado-plateado-perfil/dp/B076BVMGWC>

- Vinil blanco de puerta corrediza (Figura 2.6)



Figura 2.6 Vinil blanco de puerta corrediza

Fuente: <https://www.extrusiones.com.co/lineas-de-productos/linea-construccion/sellos-para-ventanas-puertas-y-fachadas>

- Silicón (Figura 2.7)



Figura 2.7 Silicón para vidrios

Fuente: <http://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/product/392421/Silicona-vidrios-300-ml-transparente/392421>

- Sellos de medidas (Figura 2.8)

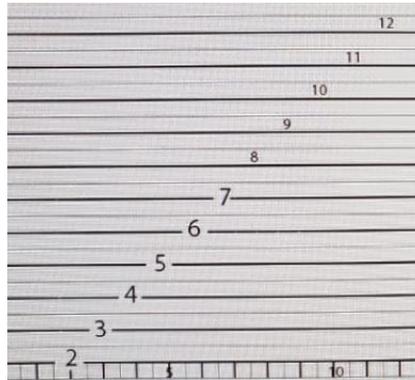


Figura 2.8 Sellos para medidas

Fuente: Elaboración propia

- Tubo de aluminio rectangular (2 mm x 4 mm) (Figura 2.9)



Figura 2.9 Tubo de aluminio rectangular

Fuente: <http://www.maestro.com.pe/productos/ferreteria>

- Perfil "U" de aluminio (Figura 2.10)



Figura 2.10 Perfil "U" de aluminio

Fuente: <https://www.amazon.es/Perfil-aluminio-para-tableros-part%C3%ADculas/dp/B008HBUFBI>

2.5.1.2 Construcción

Para la construcción del canal se utilizaron las dimensiones predeterminadas en el capítulo 2.4.1 (4.00 m de largo, 0.15 m de ancho y 0.50 m de altura) (Figura 2.11).

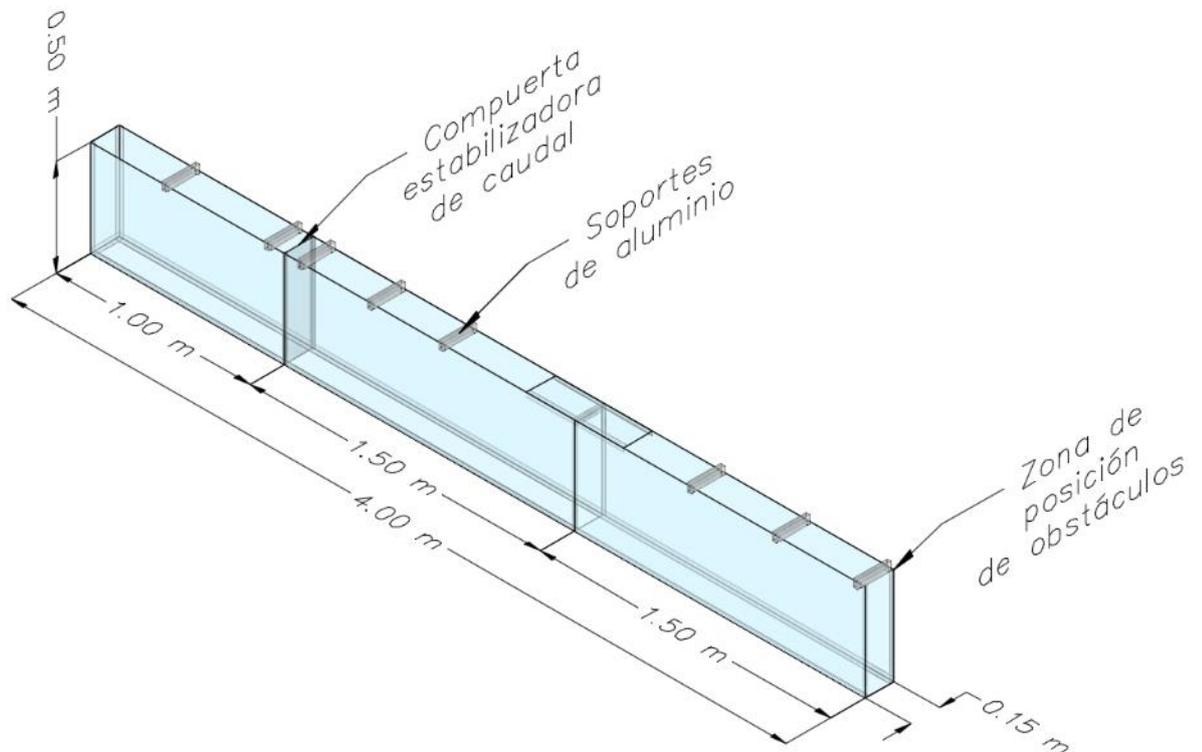


Figura 2.11 Diseño del canal del modelo físico

Fuente: Elaboración propia

Para esto se utilizó una plancha de vidrio de 6 mm (Figura 2.12) dividida en varias piezas; 2 piezas de 0.50 m x 2.50 m, 2 piezas de 0.50 m x 1.50 m, 1 pieza de 0.15 m x 2.50 m, 1 pieza de 0.15 m x 1.50 m y 1 piezas de 0.50 m x 0.15 m (Figura 2.13). Estas piezas se unieron utilizando silicón para vidrio y perfiles “L” de aluminio.

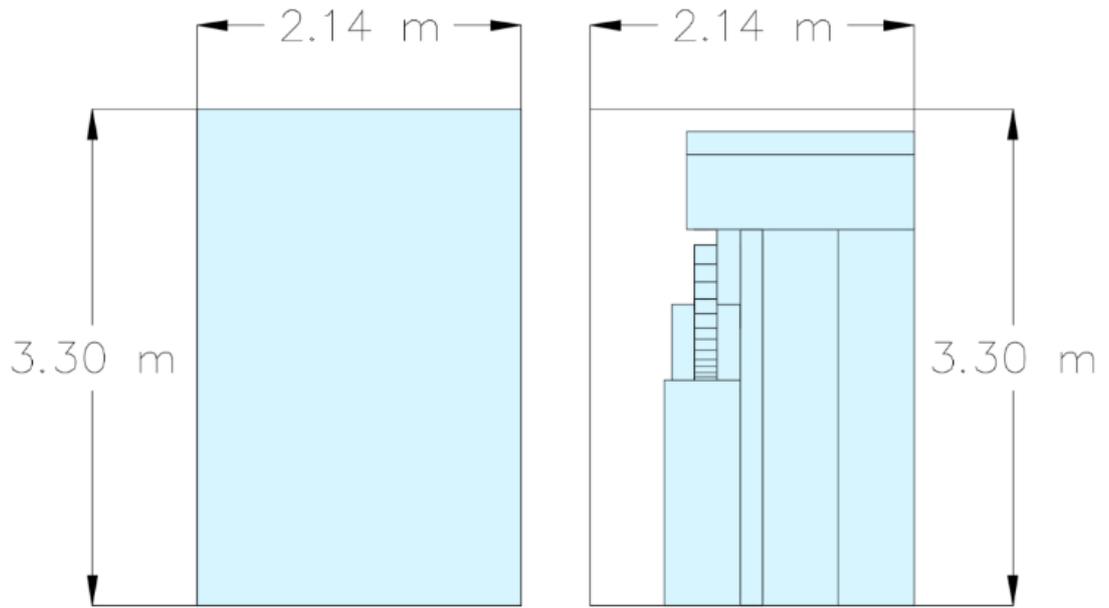


Figura 2.12 División de plancha de vidrio

Fuente: Elaboración propia

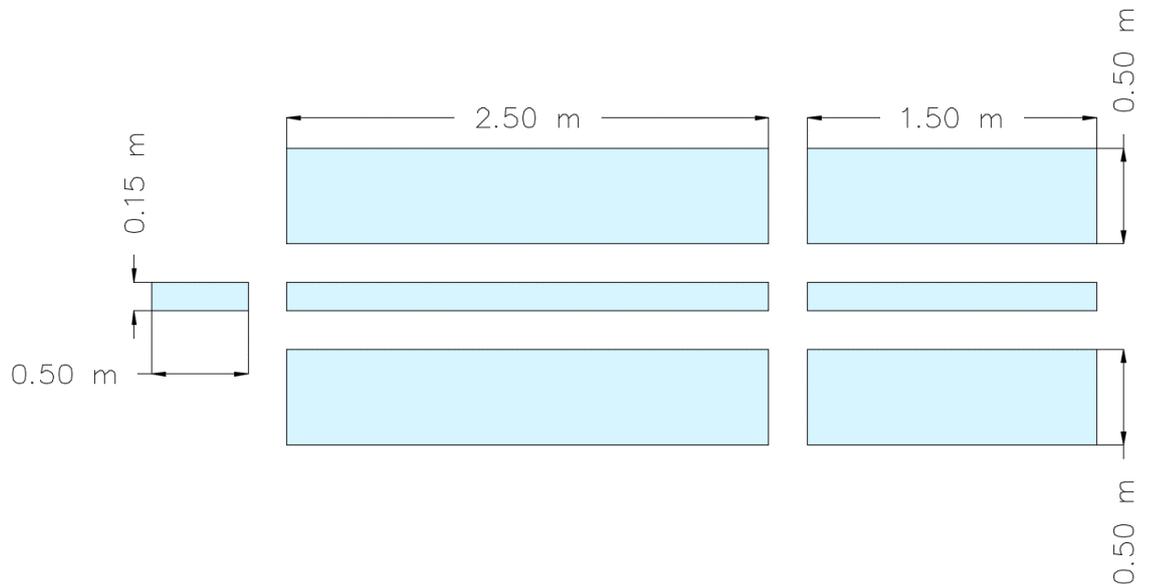


Figura 2.13 Piezas de vidrio del canal

Fuente: Elaboración propia

En los extremos exteriores del canal se colocaron sellos con medidas a cada 5 mm para facilitar la medición de las diferentes alturas y longitudes de los resaltos hidráulicos que se producirán (Figura 2.14).

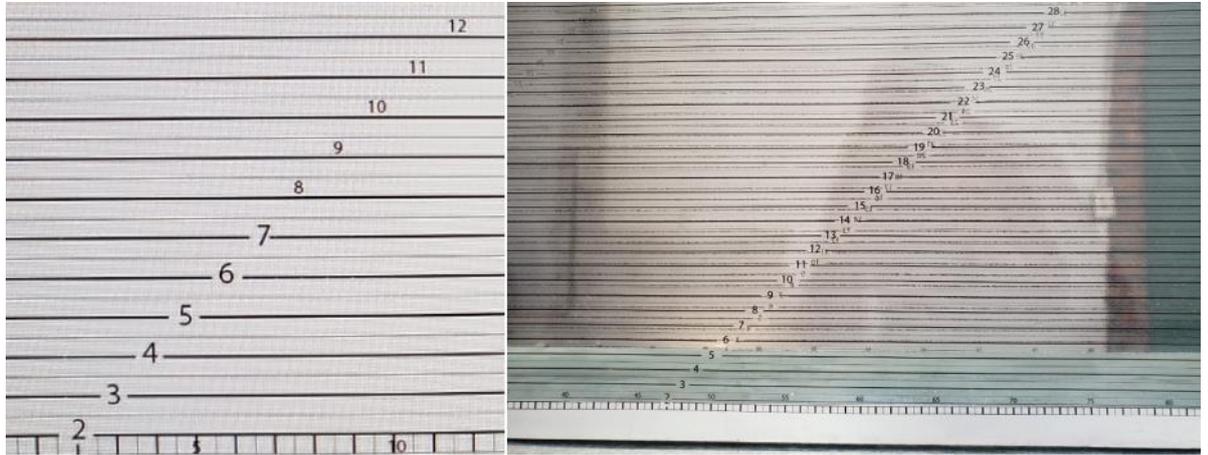


Figura 2.14 Diseño y modelo físico de los sellos de medidas

Fuente: Elaboración propia

Además de la estructura del canal se dispuso de una compuerta de vidrio (0.50 m x 0.15 m) bordeada de vinil para fácil movilidad localizada a 1 m desde el borde inicial del canal, la misma cuya apertura es regulable según sea necesario el caso (Figura 2.15). Esta compuerta sirve primordialmente para controlar los caudales turbulentos que se dan al inicio del canal para que posteriormente exista una distancia grande en donde se pueda producir el resalto y el flujo permanezca estable. Para la colocación en el lugar especificado de la compuerta se utilizaron perfiles “U” de aluminio.

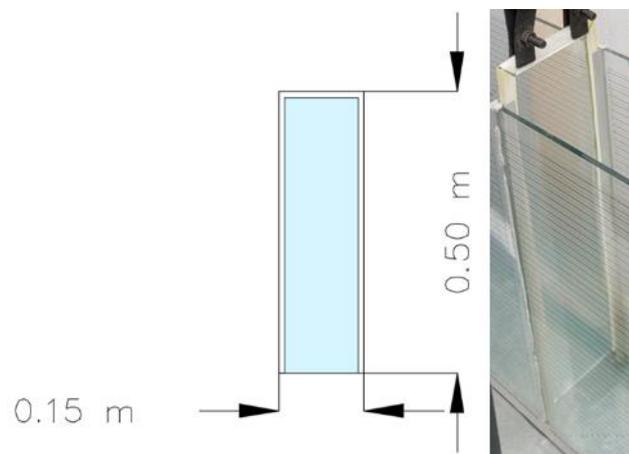


Figura 2.15 Diseño y modelo físico de compuerta de paso

Fuente: Elaboración propia

Previamente al inicio de la práctica se determinó que se utilizaría una apertura de compuerta fija de 3 cm. Esto se determinó mediante experimentación con varias aperturas de compuerta, siendo la apertura de 3 cm la única en la cual el caudal máximo y mínimo de la bomba producían una columna de agua estable antes de la compuerta. Por este motivo en la compuerta se trazó una línea roja horizontal, la cual al coincidir con el borde superior del canal indicará la posición en la que existe una apertura de 3 cm de la compuerta (Figura 2.16).



Figura 2.16 Indicación de apertura de 3 cm en la compuerta

Fuente: Elaboración propia

Para la parte final del canal se diseñaron unos obstáculos de vidrio que servirán de ayuda para que se produzca el resalto hidráulico. Estos obstáculos funcionarán como vertederos de diferentes alturas que disminuirán la velocidad del flujo y así generarán un resalto hidráulico forzado. Los obstáculos a utilizar son de ancho 0.15 m y sus alturas variarán desde los 2 cm hasta los 13 cm (Figura 2.17). Para la colocación de los obstáculos en el lugar especificado se utilizaron perfiles “U” de aluminio (Figura 2.18).

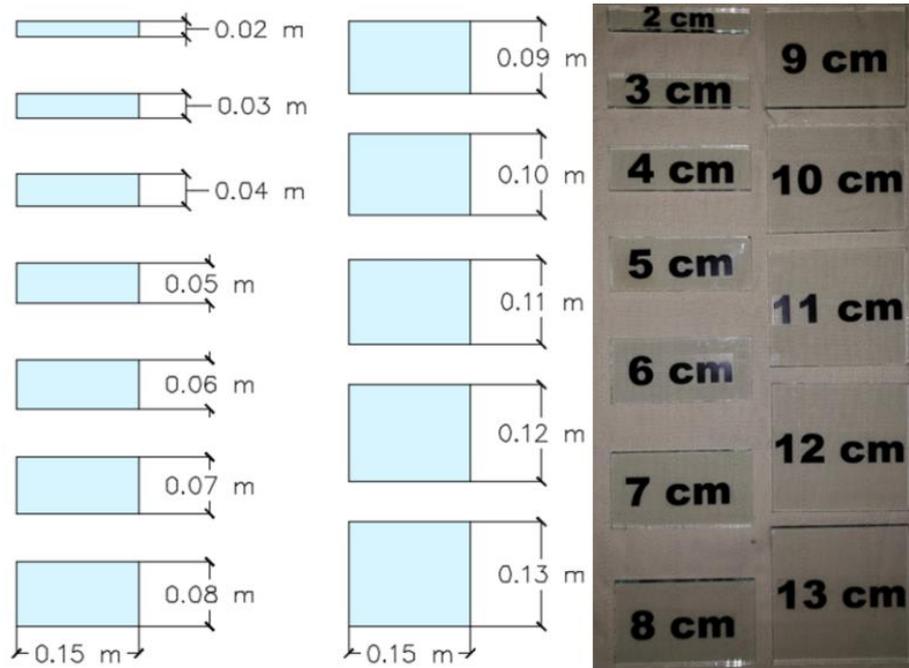


Figura 2.17 Diseño y modelo físico de los obstáculos de vidrio

Fuente: Elaboración propia

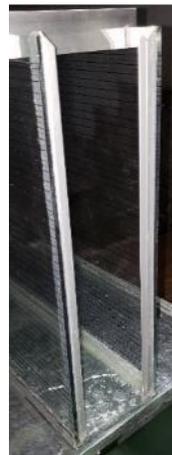


Figura 2.18 Zona de posición de obstáculos

Fuente: Elaboración propia

Por motivo de seguridad se crearon unos soportes de tubo de aluminio rectangular (Figura 2.19), cuya función es mantener unidas las planchas de vidrio verticales; ya que con el paso del tiempo, por la fuerza del agua y por sus dimensiones, son muy propensas a separarse en la parte superior.



Figura 2.19 Diseño y modelo físico de los soportes de aluminio

Fuente: Elaboración propia

2.5.2 Tanque de reserva

El tanque de reserva servirá para almacenar el agua que se utilizará en el canal para la generación del resalto hidráulico (Figura 2.20). Este tanque se conectará en dos puntos al sistema de circulación del agua para así tener la función de enviar y recibir agua conforme se regule el sistema.



Figura 2.20 Tanque de reserva del modelo

Fuente: Elaboración propia

2.5.2.1 Materiales

Los materiales utilizados para la construcción del tanque de reserva fueron:

- Planchas de metal galvanizado (Figura 2.21)



Figura 2.21 Plancha de metal galvanizado

Fuente: <http://www.acercons.com.ec/producto/tool-galvanizado/>

- Tubo de aluminio rectangular (2 mm x 4 mm) (Figura 2.22)



Figura 2.22 Tubo de aluminio rectangular

Fuente: <http://www.maestro.com.pe/productos/ferreteria>

- Tubo circular de metal estructural (2") (Figura 2.23)



Figura 2.23 Tubo circular de metal estructural

Fuente: <https://www.lowes.com/pd/Common-2-in-Actual-2-In-Metallic-Emt-10-ft-Conduit/3129561>

2.5.2.2 Construcción

Para la construcción del tanque de reserva primero se tomó como parámetro el volumen del canal, y a partir de este dato se diseñó un tanque de reserva en donde cabría este volumen más un 60% del mismo por motivos de seguridad.

$$\text{Volumen del canal} = 4.00 \text{ m} * 0.15 \text{ m} * 0.50 \text{ m} = 0.3 \text{ m}^3 = 300 \text{ litros}$$

$$\text{Volumen de seguridad} = 0.6 * 300 \text{ litros} = 180 \text{ litros}$$

$$\text{Volumen total} = 300 \text{ litros} + 180 \text{ litros} = 480 \text{ litros} = 0.48 \text{ m}^3$$

Para satisfacer este volumen se diseñó el tanque de reserva con dimensiones de 1.20 m de largo, 0.50 m de ancho y 0.80 m de altura (Figura 2.24).

$$\text{Volumen del tanque} = 1.20 \text{ m} * 0.50 \text{ m} * 0.80 \text{ m} = 0.48 \text{ m}^3$$

Para la construcción del tanque se utilizaron planchas de metal galvanizado, las cuales fueron reforzadas soldando un tubo de aluminio colocado de manera horizontal al inicio y a la mitad del tanque.

En la parte frontal del tanque se realizaron dos agujeros y se soldaron dos tubos de metal estructural de 2" de diámetro que posteriormente se unieron al sistema de circulación del agua.

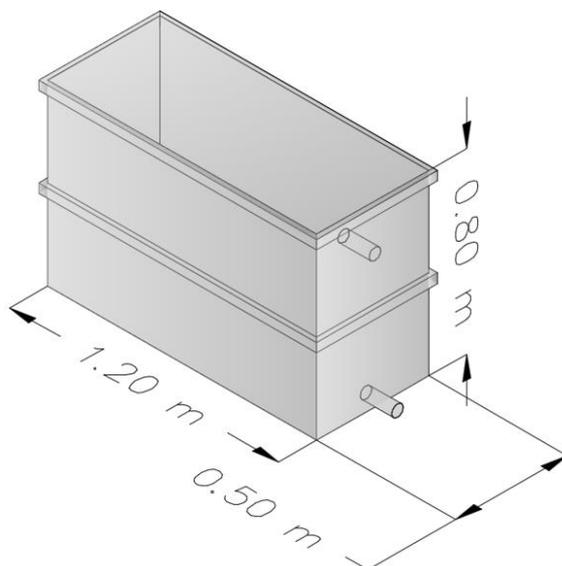


Figura 2.24 Diseño y modelo físico del tanque de reserva

Fuente: Elaboración propia

2.5.3 Probeta

Se creó una probeta con el objetivo de tener un método para la medición del caudal (Figura 2.25). Esta probeta se utilizará colocándola al final del canal en el punto en el que el agua cae en el tanque de reserva, tomando el tiempo en que la probeta se llena de agua utilizando un cronómetro. Con el dato del tiempo y el volumen de la probeta se calculará el caudal que esté fluyendo por el canal en ese momento.



Figura 2.25 Probeta del modelo

Fuente: Elaboración propia

2.5.3.1 Materiales

Los materiales utilizados para la construcción de la probeta fueron:

- Planchas de metal galvanizado (Figura 2.26)



Figura 2.26 Plancha de metal galvanizado

Fuente: <http://www.acercons.com.ec/producto/tool-galvanizado/>

- Agarraderas de hierro

2.5.3.2 Construcción

Para la construcción de la probeta se utilizó el mismo metal galvanizado que para el tanque de reserva. Se predeterminó que las dimensiones fuesen pequeñas, fáciles de manejar y que sean más anchas que el canal y menos anchas que el tanque de reserva. De esta manera se determinó que las dimensiones de la probeta fueran 0.30 m de ancho, 0.30 m de largo y 0.20 m de profundidad; lo que da como resultado que la probeta tenga capacidad para 18 litros de agua (Figura 2.27). Adicionalmente se dotó a la probeta de agarraderas para su fácil manejo.

$$\text{Volumen de probeta} = 0.20 \text{ m} * 0.30 \text{ m} * 0.30 \text{ m} = 0.018 \text{ m}^3 = 18 \text{ litros}$$

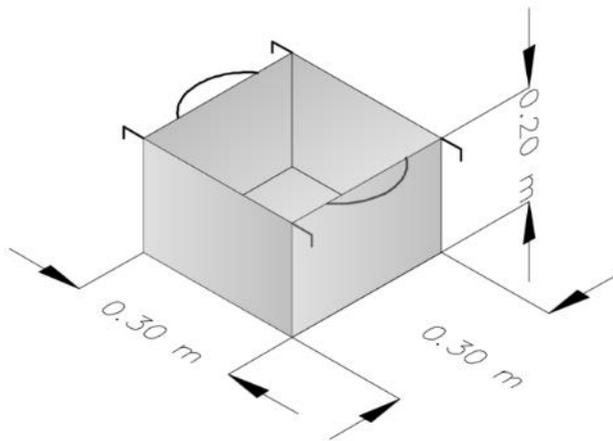


Figura 2.27 Diseño y modelo físico de probeta

Fuente: Elaboración propia

2.5.4 Sistema de circulación

El sistema de circulación del agua tiene como función principal llevar el agua desde el tanque de reserva al inicio del canal y de regreso al tanque de reserva dependiendo de la manera en la que esté regulado el mismo (Figura 2.28). Esto se hace mediante la utilización de una bomba centrífuga que succiona el agua desde el tanque llevándola por un sistema de elementos que termina en dos válvulas regulables las cuales dividen el caudal para que una parte se dirija al canal y otra al tanque de reserva.



Figura 2.28 Sistema de circulación del agua del modelo

Fuente: Elaboración propia

2.5.4.1 Materiales

Los materiales utilizados para la construcción del sistema de circulación fueron:

- 1 bomba de agua centrífuga eléctrica de 2 HP (Caudal máximo teórico = 8 litros/s) (Figura 2.29)



Bomba de agua	
BCBP2	Serial No.
Qmax 480 l/min	Hmax 20 m
Suct.Hmax 8 m	Size: 2" X 2"
1-Mot V110/220	Hz 60 3450 min ⁻¹
KW 1.5	HP 2 In 15.2 A IP 44
C 40 μF	VL 450 V ICL B
ISO 9001	Continuous duty Thermal protector YES NO

Figura 2.29 Bomba de agua centrífuga eléctrica de 2HP y sus características

Fuente: <https://www.bpecuador.com/BCBP2-BOMBA-CENTRIFUGA-ELECTRICA>

- 4 neplos perdidos de polipropileno (2") (Figura 2.30)

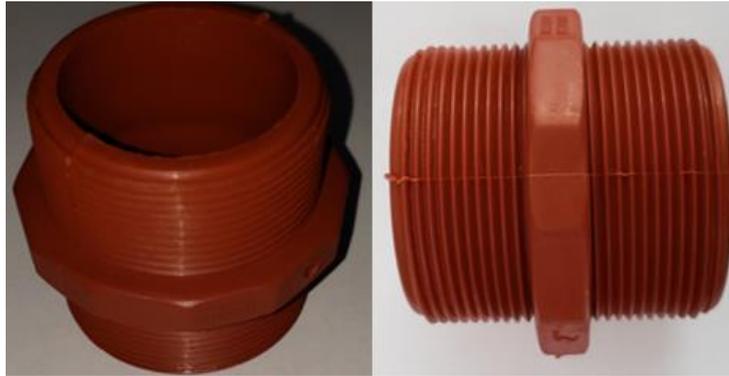


Figura 2.30 Neplo perdido de polipropileno (2")

Fuente: Elaboración propia

- 1 unión de polipropileno (2") (Figura 2.31)



Figura 2.31 Unión de polipropileno (2")

Fuente: Elaboración propia

- 1 neplo de polipropileno (2" x 15 cm) (Figura 2.32)



Figura 2.32 Neplo de polipropileno (2" x 15 cm)

Fuente: Elaboración propia

- 3 adaptadores macho de presión PVC (50 mm x 1 ½") (Figura 2.33)

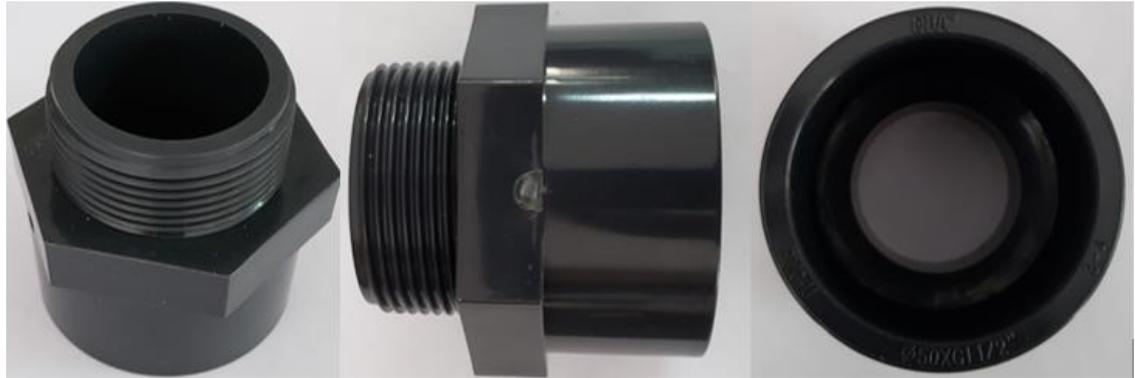


Figura 2.33 Adaptador macho de presión PVC (50 mm x 1 ½")

Fuente: Elaboración propia

- 1 tee de polipropileno (2") (Figura 2.34)



Figura 2.34 Tee de polipropileno (2")

Fuente: Elaboración propia

- 3 bushing de polipropileno (2" x 1 ½") (Figura 2.35)



Figura 2.35 Bushing de polipropileno (2" x 1 ½")

Fuente: Elaboración propia

- 2 buges PVC (63 mm x 50 mm) (Figura 2.36)

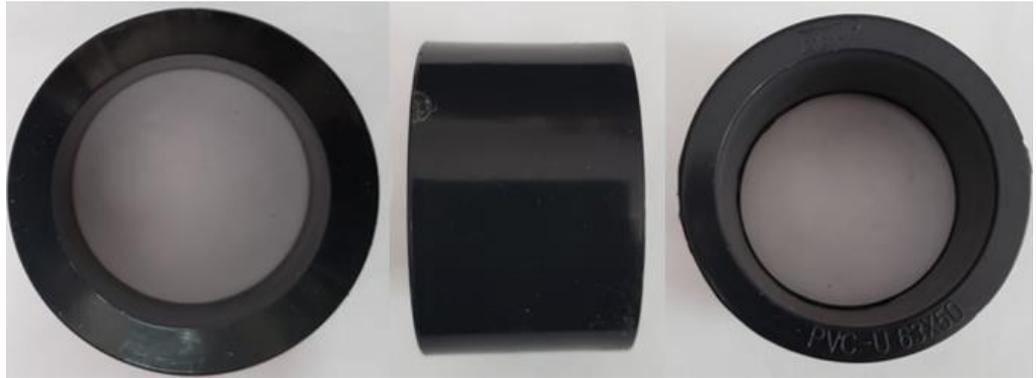


Figura 2.36 Buge PVC (63 mm x 50 mm)

Fuente: Elaboración propia

- 2 adaptadores hembra de presión PVC (63 mm x 2") (Figura 2.37)



Figura 2.37 Adaptador hembra de presión PVC (63 mm x 2")

Fuente: Elaboración propia

- 2 adaptadores flex PVC (2") (Figura 2.38)



Figura 2.38 Adaptador flex PVC (2")

Fuente: Elaboración propia

- 1 válvula check de pie de bronce (2") (Figura 2.39)



Figura 2.39 Válvula check de pie de bronce (2")

Fuente: Elaboración propia

- 5 codos PVC para desagüe espiga-campana (50 mm) (Figura 2.40)



Figura 2.40 Codo PVC para desagüe espiga-campana (50 mm)

Fuente: Elaboración propia

- 4 tubos PVC para desagüe espiga-campana (50 mm x 3.00 m) (Figura 2.41)



Figura 2.41 Tubo PVC para desagüe espiga-campana (50 mm x 3.00 m)

Fuente: Elaboración propia

- 2 válvulas esfera PVC (2") (Figura 2.42)



Figura 2.42 Válvula esfera PVC (2")

Fuente: Elaboración propia

- Pega para tubos de PVC (Figura 2.43)



Figura 2.43 Pega para tubos de PVC

Fuente: <https://www.mariorubio.com.ec/producto/kalipega-125-cc/>

- Cinta de teflón (Figura 2.44)



Figura 2.44 Cinta de teflón

Fuente: <http://www.bt-ingenieros.com/adhesivos-y-selladores/904-cinta-de-teflon.html>

2.5.4.2 Construcción

Para la construcción del sistema de circulación del agua se inició instalando la bomba en la estructura metálica. Después se procedió a instalar todos los elementos adaptadores a la bomba y al tanque de reserva (Figura 2.45). Por último se instalaron las tuberías por las cuáles circularía el agua (Figura 2.46).

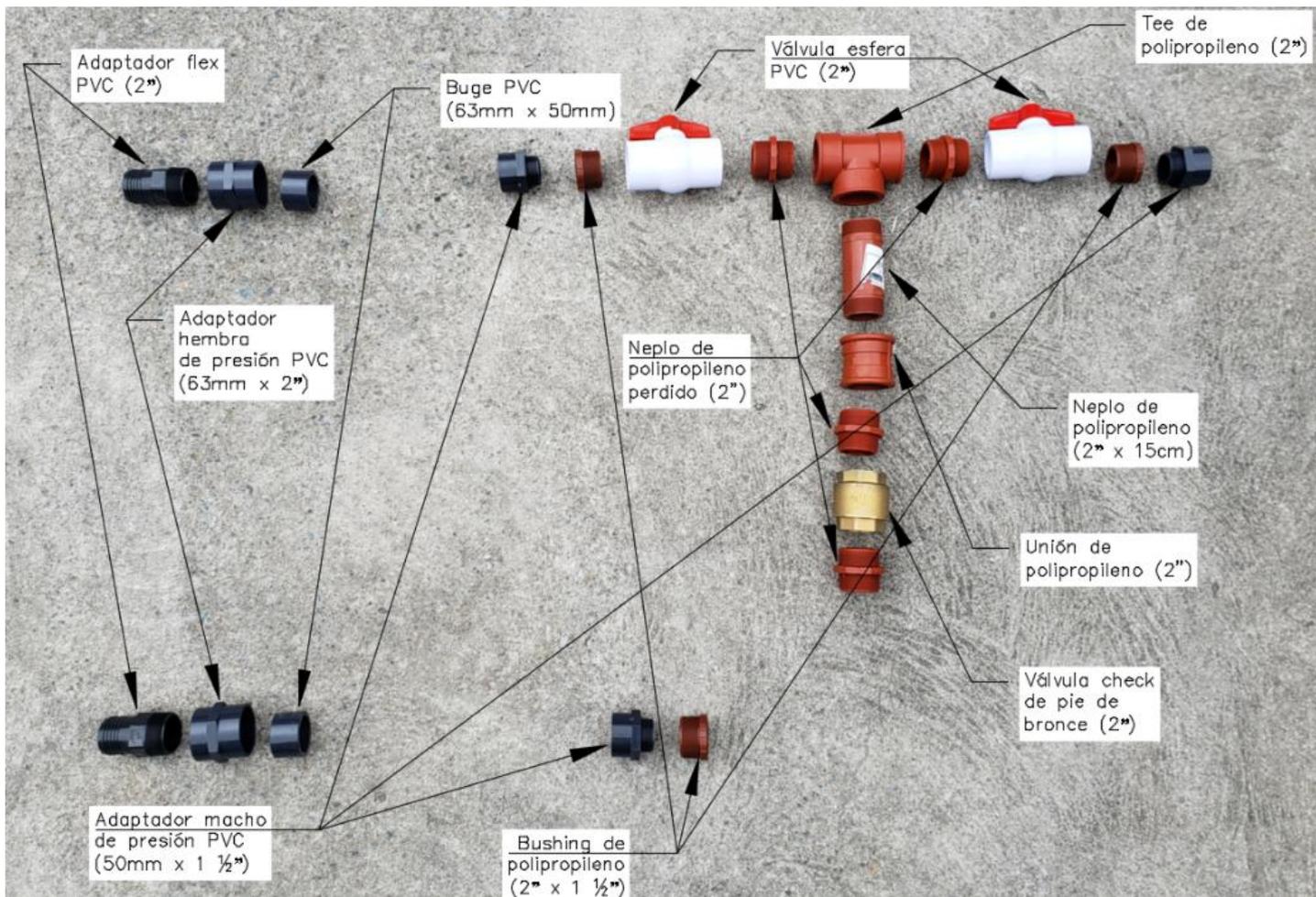


Figura 2.45 Elementos de unión del sistema de circulación

Fuente: Elaboración propia

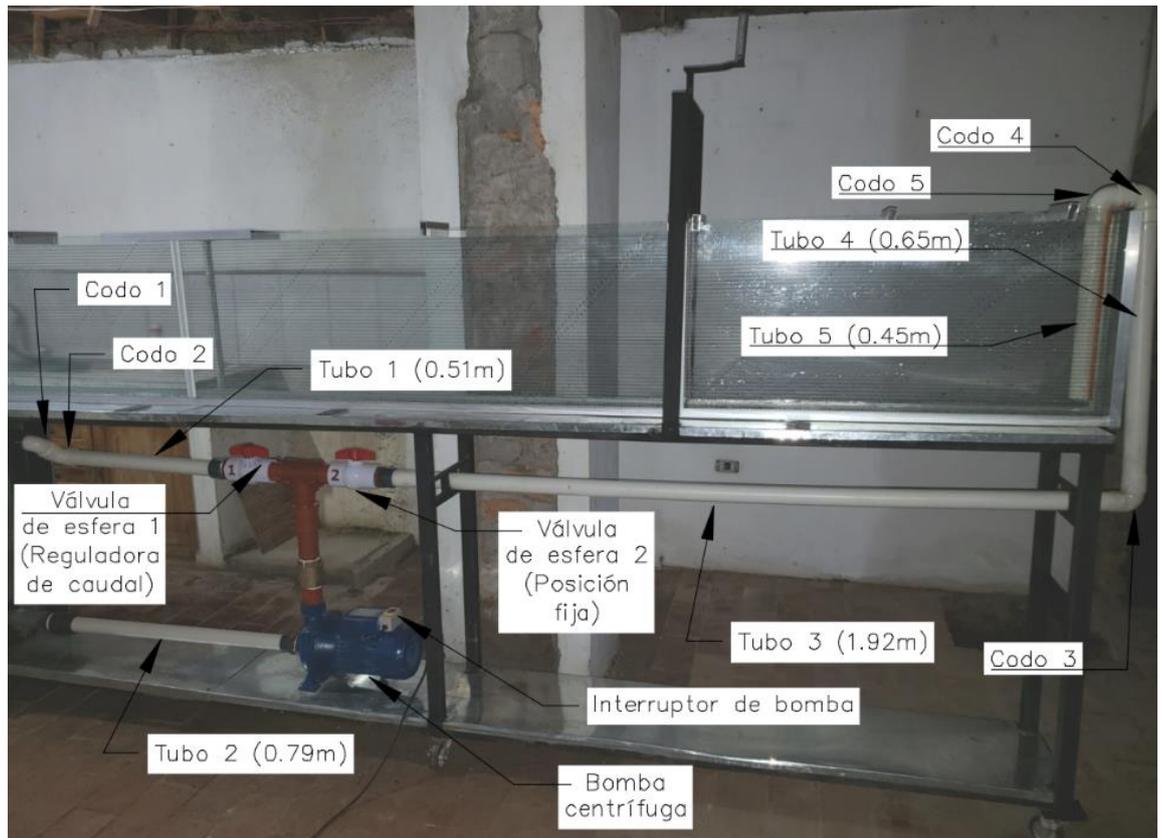


Figura 2.46 Partes del sistema de circulación de agua del modelo

Fuente: Elaboración propia

El ensamble del sistema empezó colocando la bomba en una posición fija frente al tanque de reserva direccionando su orificio de succión frente al tubo estructural inferior del tanque.

Se procedió instalando la válvula check en el orificio de salida de la bomba, necesaria para evitar el retorno indeseado del agua a la misma ya que esto podría producir un malfuncionamiento.

Para la regulación del caudal se optó por la instalación de una tee de polipropileno a continuación de la válvula check en cuyos extremos se colocaron válvulas esfera de PVC. Se determinó que la válvula esfera a utilizar para regular el caudal sería la válvula que se dirige al tanque de reserva por lo que a la misma se le denominó “Válvula 1” y se colocaron marcas en ella para determinar posiciones distintas que producirán diferentes caudales, mientras que la válvula esfera que se encuentra en dirección al canal se le denominó “Válvula 2” y se mantendrá siempre abierta (Figura 2.47). Para mantener abiertas las válvulas sus manijas deben estar paralelas a la tubería mientras que para cerrarlas deben estar perpendiculares a ellas.



Figura 2.47 Válvula 1 cerrada (regulable) y válvula 2 abierta (fija)

Fuente: Elaboración propia

Después de esto se colocaron las conexiones respectivas en las válvulas, bomba y tubos estructurales. Se tomaron las medidas necesarias y se cortaron 5 tubos de PVC (0.51 m, 0.79 m, 1.92 m, 0.65 m y 0.45 m) y 5 codos PVC espiga-campana necesarios para completar la conexión del sistema. Para las uniones entre los elementos roscables se utilizó cinta de teflón, mientras que para los elementos de desagüe de PVC se utilizó pega para tubos.

2.5.5 Estructura metálica

La estructura metálica tiene por función la de mantener unidos y ser el soporte del canal, el sistema de circulación y el tanque de reserva (Figura 2.48). Esta estructura tiene movilidad mediante ruedas en su base y está construida de tal manera que posee una leve pendiente que ayuda a la circulación del flujo.

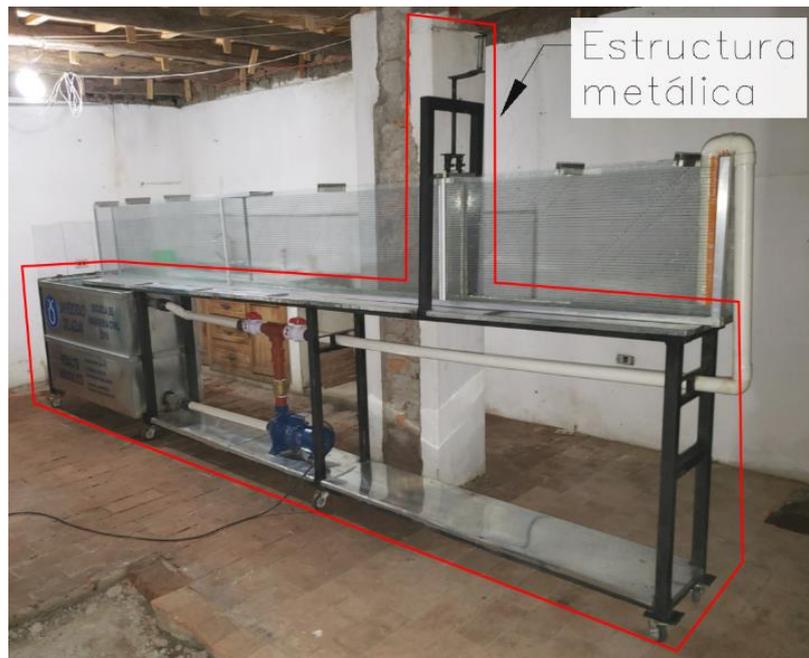


Figura 2.48 Estructura metálica del modelo

Fuente: Elaboración propia

2.5.5.1 Materiales

Los materiales utilizados para la construcción de la estructura metálica fueron:

- Planchas de metal galvanizado (Figura 2.49)



Figura 2.49 Plancha de metal galvanizado

Fuente: <http://www.acercons.com.ec/producto/tool-galvanizado/>

- Tubo estructural de metal galvanizado cuadrado (4 cm x 4 cm) (Figura 2.50)



Figura 2.50 Tubo estructural de metal galvanizado cuadrado

Fuente: <https://www.disensa.com.ec/tubo--t-e-n-c--100-x-100-x-4-mm/p>

- 4 pares de ruedas (Figura 2.51)



Figura 2.51 Rueda

Fuente: <http://www.herrajessanmartin.com/tienda/herrajes-para-muebles/ruedas>

- Mecanismo de apertura de compuerta de paso

2.5.2 Construcción

Para la construcción de la estructura metálica se tomaron en cuenta las medidas en longitud y ancho de todos los elementos anteriormente nombrados para crear un solo cuerpo que los soportase a todos. Ya que el peso de todos estos elementos es grande, se optó por utilizar tubos estructurales para la creación del esqueleto (Figura 2.52).



Figura 2.52 Tubos estructurales del esqueleto del modelo físico

Fuente: Elaboración propia

Se determinó que la estructura constaría de dos plantas; una superior en donde se colocaría el canal y otra inferior más larga que la superior en donde se colocarían el tanque de reserva y el sistema de circulación. En cada una de las plantas se colocaron planchas de metal galvanizado como piso para poder colocar los diferentes elementos en las mismas. La planta superior consta de una pendiente de 1.5% que ayuda al movimiento del agua dentro del canal (Figura 2.53).

$$\text{Pendiente} = \frac{0.90 \text{ m} - 0.84 \text{ m}}{4.00 \text{ m}} * 100 = 1.5 \%$$

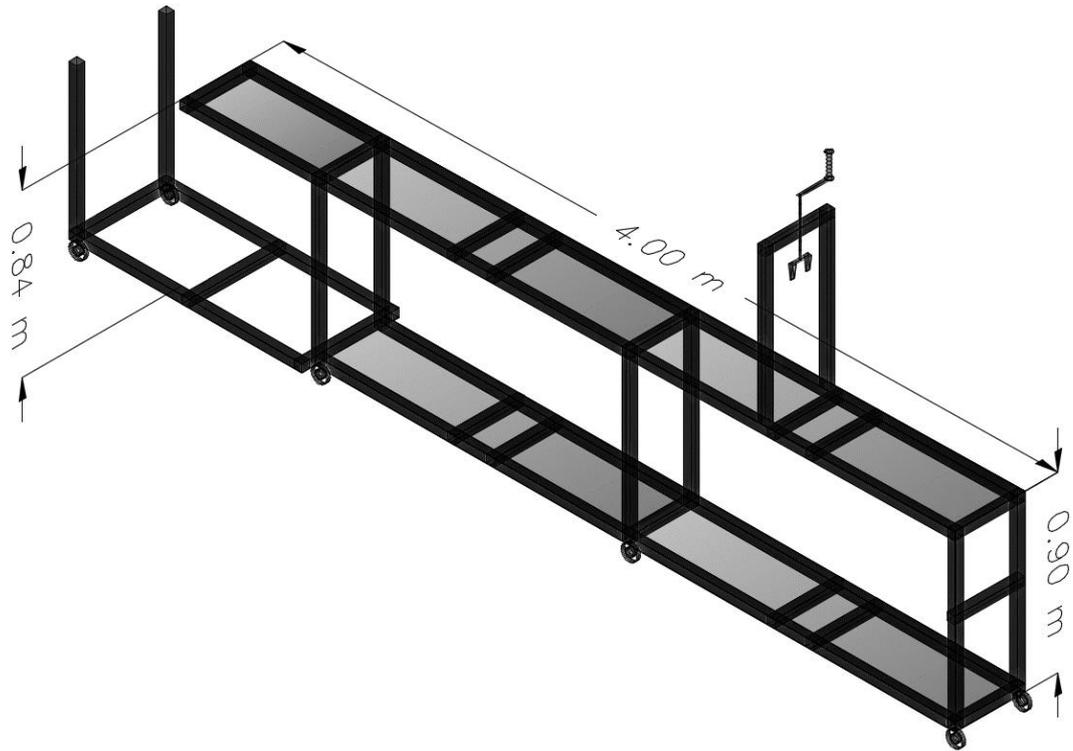


Figura 2.53 Diseño de la estructura metálica

Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de brindar movilidad a la estructura se dotó de 4 pares de ruedas colocados en la base de cada tubo estructural que funcionase como columna del esqueleto (Figura 2.54).



Figura 2.54 Rueda en la base de un tubo estructural (Columna)

Fuente: Elaboración propia

Por último en la planta superior de la estructura se instaló un sistema de apertura de compuerta para facilitar el uso de la misma y mantener a la compuerta fija en la apertura de 3 cm. Este sistema se construyó utilizando diferentes elementos metálicos

y se lo colocó a 1.00 m del inicio de la estructura, en el lugar en donde se ubicaría la compuerta al momento de colocar el canal en la estructura. Para abrir la compuerta se debe girar en sentido contrario a las manecillas del reloj, mientras que para cerrar la compuerta se debe primero girar en sentido de las manecillas del reloj y luego empujar la compuerta hacia abajo (Figura 2.55).



Figura 2.55 Mecanismo de apertura de la compuerta de paso

Fuente: Elaboración propia

2.6 Validación del modelo

Con el motivo de generar un ejemplo claro de cómo realizar la práctica de laboratorio de resalto hidráulico se tomó los datos señalados en la ficha de recolección de datos en 5 posiciones distintas de la válvula de esfera, los cuales fueron usados en la ficha de resultados para obtener todos datos propuestos.

Previamente al inicio de la práctica se determinó que se utilizaría una apertura de compuerta de 3 cm. Esto se determinó mediante experimentación con varias aperturas de compuerta, siendo la apertura de 3 cm la única en la cual el caudal máximo y mínimo de la bomba producían columna de agua estable antes de la compuerta.

En el Anexo 1 consta la ficha de resultados de la práctica realizada. A continuación se analizarán los datos obtenidos de esta práctica y se determinarán conclusiones específicas y generales sobre la práctica de laboratorio de resalto hidráulico.

En cada una de las posiciones de la válvula se utilizaron los 12 obstáculos y se obtuvieron en total 60 resaltos hidráulicos, los cuales fueron divididos entre libres y

sumergidos. Para el cálculo de los diferentes términos en la ficha de resultados solo se tomaron en cuenta los resaltos libres, ya que sus datos son los que mayor precisión tienen en las fórmulas descritas anteriormente.

Tabla 2.1 Resaltos hidráulicos libres y sumergidos

Tipo de resalto	Cantidad	(%)
Libres	34	56.67
Sumergidos	26	43.33

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2.1 se puede ver que 34 fueron los resaltos hidráulicos libres que se dieron en esta práctica. Siendo esta cantidad mayor al 50% de todas las situaciones aforadas se concluye que la práctica está diseñada con éxito, ya que existe una gran cantidad de situaciones en que los estudiantes podrán producir el resalto libre y analizarlo.

Tabla 2.2 Obstáculos utilizados en la práctica y el porcentaje de veces en que produjeron resaltos hidráulicos libres

h (m)	Cantidad	(%)
0.02	5	100
0.03	5	100
0.04	5	100
0.05	5	100
0.06	5	100
0.07	4	80
0.08	3	60
0.09	2	40
0.10	0	0
0.11	0	0
0.12	0	0
0.13	0	0

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2.2 se puede apreciar la cantidad y el porcentaje de veces que cada uno de los obstáculos produjo un resalto hidráulico libre. Basándonos en estos datos podemos concluir que solo con los obstáculos de medidas de 2 a 9 cm se producen resaltos hidráulicos libres. A pesar de haber construido los obstáculos de medidas de 10 a 13 cm, éstos no producen resaltos libres por lo que no son relevantes para aplicar en la ficha de resultados, pero de igual manera se los puede utilizar de manera demostrativa para visualizar un resalto hidráulico sumergido.

Tabla 2.3 Rango de valores de términos más relevantes de la práctica

Dato	Rango		
y_1 (cm)	2	-	2.5
y_2 (cm)	6	-	14
L (cm)	16	-	86
X (cm)	18	-	295
h' (cm)	6.5	-	17
Q (lts/s)	2.42	-	5.30
y_c (cm)	2.99	-	5.03
H (cm)	4.50	-	8.00
V_1 (m/s)	0.81	-	1.41
V_2 (m/s)	0.24	-	0.35
F_1	1.82	-	2.85
F_2	0.22	-	0.39
E_1 (cm)	5.33	-	12.68
E_2 (cm)	6.37	-	14.32
ΔE (cm)	-2.64	-	2.04
E_2/E_1	0.84	-	1.34
hr (cm)	4	-	11.5
ΔL (cm)	0	-	20.46
EL (%)	0	-	53.20
Δy_2 (cm)	1.08	-	5.13
E_{y_2} (%)	12.16	-	65.19
Re_1	12673	-	26312
Re_2	8600	-	15036

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2.3 se expresa en manera de resumen el rango de datos (Valor mínimo y máximo) obtenidos en campo y calculados en la ficha de resultados de los términos más relevantes de la práctica.

Primeramente notamos que los valores de y_1 siempre son menores a la apertura de la compuerta (3 cm), por lo que se comprueba que no existe resalto hidráulico en la salida de la misma.

Basándonos en los datos de y_2 y h' podemos notar que la altura máxima del agua que se puede dar en el modelo es de 17 cm y la longitud máxima del resalto es 86 cm. Con esto se comprueba que el dimensionamiento, realizado en el numeral 2.4.2, es correcto debido a que el modelo se diseñó teniendo en cuenta que la altura máxima de resalto que se podía generar era de 40 cm y la longitud máxima de 3.00 m. Con lo anteriormente descrito se puede concluir que el canal funciona, en las condiciones más desfavorables, con un amplio margen de seguridad prestando un funcionamiento adecuado.

Se aprecia también que las alturas (y_1 , y_2 , h_r , y_c , H) son directamente proporcionales al caudal.

Analizando los valores de X se nota que se pueden dar resaltos libres desde 5 cm desde la compuerta hasta 18 cm antes del final del canal, esto indica que se pueden producir hasta 34 resaltos hidráulicos libres en una longitud de 2.77 m., aprovechando hasta un 92.33% de la longitud destinada para ello.

También podemos notar que mientras se tiene mayor caudal existen más cantidad de obstáculos usados que producen resaltos libres, esto ocurre porque mientras mayor sea el caudal los valores de X disminuyen ya que aumenta la fuerza del agua.

Se puede notar una tendencia de que a mayor caudal existen también mayor cantidad de obstáculos que producen resaltos en donde los valores de X y L son iguales, esto quiere decir que en estos casos el resalto no se termina de formar en términos de longitud.

Existe una tendencia de que h' crece al mismo ritmo que h . Resultado de esto es que se tienen datos muy parecidos de H para todos los resaltos analizados con un mismo caudal. Esto quiere decir que el valor de H es dependiente casi completamente del caudal, más no del obstáculo utilizado.

Después de haber realizado la práctica se puede verificar que el caudal máximo que la bomba tiene posterior a su instalación es de 5.3 lts/s, esto quiere decir que la bomba tiene un error experimental de 33.75%. A pesar de tener este error experimental se

puede concluir en que la bomba escogida es efectiva, ya que todos los caudales producidos por la misma produjeron un flujo supercrítico necesario para la creación del resalto hidráulico.

$$EQ = \frac{8 \text{ lts/s} - 5.3 \text{ lts/s}}{8 \text{ lts/s}} * 100 = 33.75 \%$$

La velocidad del agua en el modelo en cualquier sección variará entre los valores de 0.24 m/s y 1.41 m/s.

Basándonos en los valores de F_1 se puede apreciar que el mismo tiene un rango de 1.82 a 2.85. Analizando esto con los rangos de la Tabla 1.3 podemos concluir con que al hacer la práctica se obtuvo dos tipos de resalto únicamente (Débil y oscilante) en las cantidades y porcentajes determinados en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Tipos de resaltos hidráulicos y su porcentaje

Tipo de resalto	Cantidad	(%)
No resalto	0	0
Ondular	0	0
Débil	18	52.94
Oscilante	16	47.06
Estable	0	0
Fuerte	0	0

Fuente: Elaboración propia

A manera de comprobación se puede observar que todos los valores de F_1 son mayores a 1 por lo que el flujo es supercrítico al inicio de todos los resaltos, y que todos los valores de F_2 son menores a 1 por lo que el flujo es subcrítico al final de todos los resaltos.

Al momento de analizar los valores de ΔE se pudo apreciar un fenómeno; en lugar de que en todos los resaltos analizados se produzca una pérdida de energía, en la mayoría de casos se produjo un aumento en la energía entre las dos secciones del resalto. Se considera como un aumento de energía ya que la fórmula arrojó un valor negativo. Esto se puede asumir como una consecuencia del uso de los obstáculos al

final del canal para que se produzca artificialmente el resalto hidráulico. Al momento de analizar en qué situaciones se produce esto, se notó que de manera general en los obstáculos de menor medida se produce la pérdida mayor o el menor aumento de energía; y mientras se analizan los resaltos producidos por los obstáculos siguientes en medida se observa que la pérdida disminuye o el aumento de energía se hace mayor. Se notó también que mientras mayor sea el caudal los valores de ΔE tienden a aumentar. La pérdida de energía más grande que se dio fue de 2.04 cm mientras que el aumento de energía más grande fue de 2.64 cm.

Analizando la eficiencia del resalto E_2/E_1 se puede concluir en que mientras aumenta el valor del caudal se tiene menor eficiencia. Se puede apreciar también que en un mismo caudal al colocar obstáculos de mayor medida se obtienen resaltos de mayor eficiencia.

En esta práctica se puede notar que se han obtenido muchos resaltos para analizar. El rango de altura de los mismos varía entre 4 cm y 11.5 cm, por lo que se puede decir que se tienen resaltos muy distintos para el análisis. Se puede notar que mientras se usan obstáculos de mayor medida se obtienen resaltos hidráulicos de mayor altura. Se aprecia también que mientras mayor sea el caudal se tiene mayor variación entre las alturas de los resaltos producidos por los diferentes obstáculos en ese determinado caudal.

Tabla 2.5 Fórmulas de la longitud del resalto hidráulico utilizadas y su porcentaje en cuando fueron las más certeras

Fórmula	Cantidad	(%)
Smetana	9	26.47
Safránez	4	11.76
Einwachter	6	17.65
Wóycicki	6	17.65
Chertusov	3	8.82
USBR	6	17.65

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2.5 se pueden apreciar la cantidad y el porcentaje de veces en que cada fórmula del resalto hidráulico descrita en la Tabla 1.4 fue la más aproximada a la medida en campo. Esto se realizó con el fin de determinar cuál de estas fórmulas es la más precisa. Los resultados muestran que la fórmula con más certeza fue la de Smetana con un 26.47 % de acierto mientras la de menos certeza fue la de Chertusov con un 8.82 %.

En relación a ΔL y EL se puede apreciar que sus valores son mayores (existe mayor error) cuando se trata de los resaltos hidráulicos producidos por los obstáculos más pequeños siendo el error más grande 20.46 cm (53.2 %). Esto concuerda con los casos en los que los valores de X son iguales a L , por lo que se comprueba que esto ocurre debido a que el resalto no se ha formado completamente en su longitud. En los resaltos en donde se logra formar el resalto por completo se pueden apreciar que solamente existen errores de hasta un 20 %.

Otra consecuencia del uso de los obstáculos es que los valores de Δy_2 y Ey_2 tengan un gran rango de valores (1.08 cm a 5.13 cm). Esto ocurre porque se produce un resalto hidráulico forzado, el cuál al compararse con el calculado con la fórmula general (Deducida de un resalto natural) genera discrepancias grandes, las cuales se toman como aceptables por motivo de la práctica en cuestión.

Los Números de Reynolds en cualquier posición del resalto y del canal variarán entre el rango de 8600 a 26312, por lo que se puede concluir que siempre se tendrá un flujo de régimen turbulento. Esto es común cuando se trata de un flujo rápidamente variado.

En la parte final de la ficha de resultados, basándose en los valores calculados de F_1 , X/h' y h/y_1 se procedió a analizar cada punto (F_1 ; h/y_1) con cada respectiva curva interpolada X/h' de cada uno de los resaltos producidos. Los resultados mostraron que en todos los casos el punto se encuentra en la parte de arriba y a la izquierda de la curva, lo cual según lo analizado en el capítulo 1.1.10 se interpreta en que el obstáculo es muy alto, lo que produce que el resalto se establezca aguas arriba del mismo, que es lo que en campo podemos comprobar ya que los valores de X son todos mayores a 18 cm. Como paso previo a este análisis se puede comprobar que la condición del capítulo 1.1.10 se cumple claramente, ya que en esta práctica se tiene un valor de $y_3=0$, ya que después del obstáculo el agua cae libremente al tanque de reserva.

Tabla 2.6 Tipos de resalto producidos en la práctica con sus respectivos caudales y valores de y_1

Tipo de resalto	y_1 (cm)	Q (lts/s)	F_1
Débil	2	2.42	1.82
Débil	2	3	2.26
Débil	2.5	3.65	1.97
Oscilante	2.5	4.75	2.56
Oscilante	2.5	5.30	2.85

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.7. Rangos de caudales teóricos que generan diferentes tipos de resalto usando los valores de y_1 producidos en la práctica.

y_1 (cm)	Tipo de resalto	Q (lts/s)			F_1		
2	Débil	2.26	-	3.32	1.70	-	2.50
	Oscilante	3.32	-	5.98	2.50	-	4.50
2.5	Ondular	1.86	-	3.16	1.00	-	1.70
	Débil	3.16	-	4.64	1.70	-	2.50
	Oscilante	4.64	-	8.36	2.50	-	4.50

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2.6 se muestra en manera de resumen los diferentes tipos de resalto hidráulico que se produjeron por los caudales analizados en la práctica. Como se pudo notar en la práctica mientras más crece el caudal también crece el valor de y_1 , pero no a la misma razón, por lo que existen dos variables que influyen en el tipo de resalto generado (y_1 y Q).

También se puede apreciar que el tipo de resalto que se da no está influenciado por el tamaño del obstáculo que se utilice, por lo que tendremos el mismo tipo de resalto hidráulico en todas las simulaciones de una misma posición de la válvula.

Para analizar estas variables y cómo influyen en el tipo de resalto se creó la Tabla 2.7 en la cual se muestra los valores de los diferentes rangos de caudales teóricos que producirían distintos tipos de resaltos hidráulicos basándose en los valores de y_1 que se dieron en la práctica y en los tipos de resalto hidráulico de la Tabla 1.3.

Combinando estas dos tablas se obtuvo la Tabla 2.8 en la cual constan los rangos de caudales que pueden darse en la práctica y el/los tipos de resalto que se podrían generar en ese rango de caudales. Como no se conoce con exactitud el caudal en el que la altura y_1 cambia de 2 cm a 2.5 cm; en los rangos de (3.00 – 3.16 lts/s) y (3.32 – 3.65 lts/s) existen 2 tipos de resaltos hidráulicos posibles.

Tabla 2.8 Rangos de caudales que se pueden dar en la práctica con los tipos de resalto hidráulico que se generarían en cada uno

Q (lts/s)	Tipo de resalto
2.42 - 3.00	Débil
3.00 - 3.16	Débil (Si $y_1=2$ cm) u Ondular (Si $y_1=2.5$ cm)
3.16 - 3.32	Débil
3.32 - 3.65	Oscilante (Si $y_1=2$ cm) o Débil (Si $y_1=2.5$ cm)
3.65 - 4.64	Débil
4.64 - 5.30	Oscilante

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III. ELABORACIÓN DE LA GUÍA METODOLÓGICA

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE LABORATORIO EN EL MODELO FÍSICO SOBRE EL ELEMENTO HIDRÁULICO RESALTO HIDRÁULICO DE LA ASIGNATURA MECÁNICA DE FLUIDOS DE LA UNIVERSIDAD DEL AZUAY

OBJETIVO GENERAL

Generar a través del modelo físico, un número determinado de resaltos hidráulicos con la finalidad de aplicar los conocimientos impartidos previamente acerca de este tema.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Distinguir y explicar las particularidades de cada uno de los resaltos generados.
- Determinar y recolectar información relevante; tal como: longitud, alturas, velocidades, números de Froude y Reynolds de cada uno de los resaltos modelados.
- Comparar los resultados obtenidos en el laboratorio frente a las formulaciones teóricas.

DESCRIPCIÓN

Esta práctica de laboratorio se basa en la creación de un resalto hidráulico en un modelo físico probado con anterioridad. En esta práctica se verá más a profundidad el comportamiento físico de este elemento con el fin de lograr profundizar el aprendizaje de los estudiantes, para ello se cuenta con un modelo físico y todos los accesorios necesarios para poder cumplir con la práctica en su totalidad. El tiempo promedio para realizar la práctica completa es de 90 minutos.

EQUIPO Y HERRAMIENTAS

Para poder realizar la práctica de manera óptima, el estudiante o profesor deberá disponer de lo siguiente:

- Modelo físico (Figura 3.1)

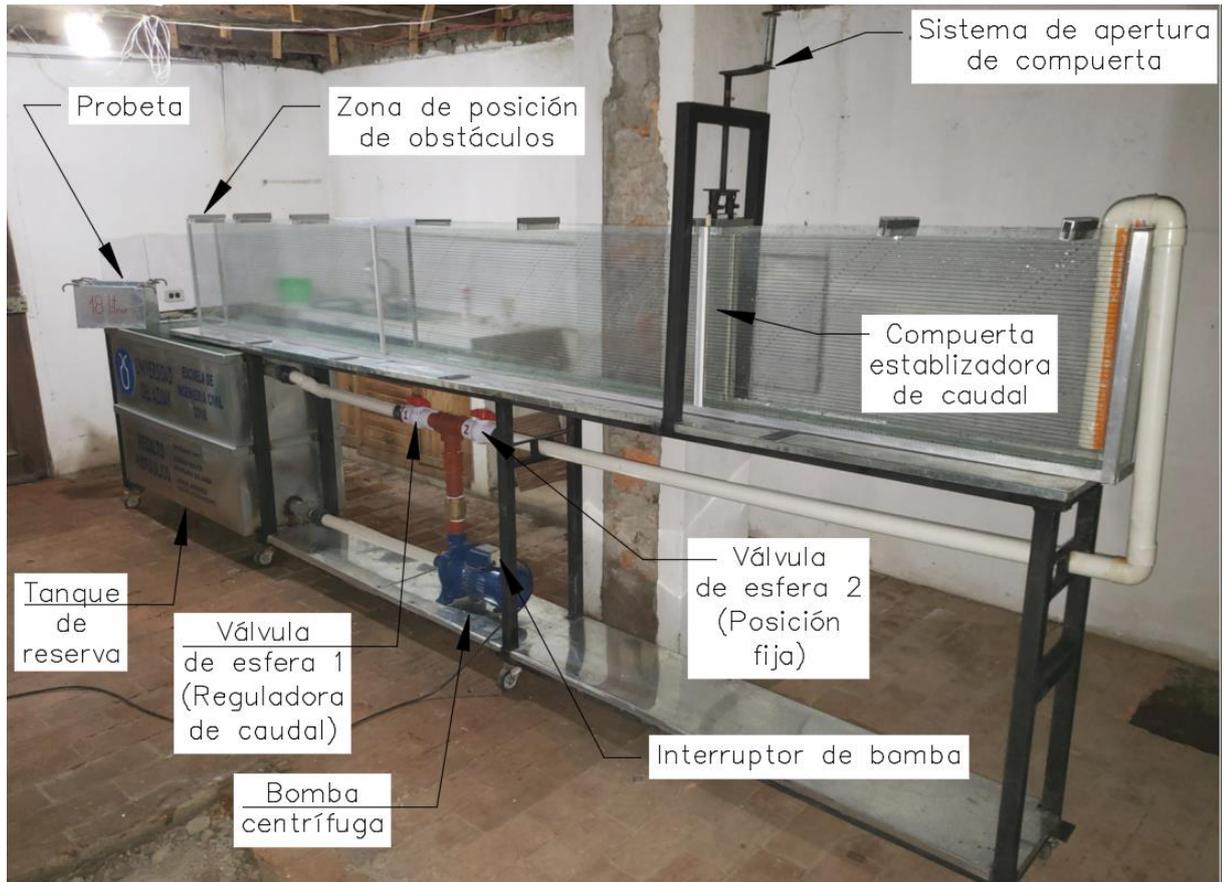


Figura 3.1 Modelo físico y sus partes más relevantes

Fuente: Elaboración propia

- Ficha de recolección de datos (Figura 3.26)
- Ficha de resultados (Figura 3.27)

- Cronómetro (Figura 3.2)



Figura 3.2 Cronómetro

Fuente: <https://www.mundosilbato.es/hs-80tw-1ef-cronometro-casio-hs-80tw-1ef-con-funcion-arbitro.html>

- Marcador (Figura 3.3)



Figura 3.3 Marcador

Fuente: <http://www.misutiles.com/marcadores/4303-marcador-bic-marking-para-pizarra-azul.html>

- Cinta métrica (3 m o más) (Figura 3.4)



Figura 3.4 Cinta métrica

Fuente: <https://www.grainger.com.mx/Todas-las-Categor%C3%ADas-de-productos/Herramientas-Manuales/Herramientas-de-Medici%C3%B3n-y-Trazado/Cintas-de-Medir/Cinta-M%C3%A9trica,3L-m,1-2An-pulg-,Acero/p/2LTM8>.

- Probeta (18 litros) (Figura 3.5)



Figura 3.5 Probeta

Fuente: Elaboración propia

- Obstáculos de vidrio (2 cm a 13 cm) (Figura 3.6)



Figura 3.6 Obstáculos de vidrio

Fuente: Elaboración propia

- Calculadora (Figura 3.7)

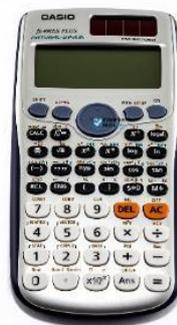


Figura 3.7 Calculadora

Fuente: <https://www.comprafacil.mx/products/calculadora-cientifica-casio-fx991es-plus-417-funciones>

FÓRMULAS

Las fórmulas a utilizar en el desarrollo de la práctica de resalto hidráulico son las siguientes:

Fórmula 1. Ecuación del tiempo promedio

$$t_p = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} \quad (1)$$

t_n = Medida de tiempo n en que se llena la probeta (s)

t_p = Tiempo promedio en que se llena la probeta (s)

Fórmula 2. Ecuación del caudal

$$Q = \frac{V_p}{t_p} \quad (2)$$

Q = Caudal del flujo (m^3/s)

t_p = Tiempo promedio en que se llena la probeta (s)

V_p = Volumen de probeta (m^3)

Fórmula 3. Ecuación de la altura del flujo crítico

$$y_c = \left(\frac{Q}{b \cdot \sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad (3)$$

Q = Caudal del flujo (m^3/s)

b = Ancho del canal (m)

g = Valor de la gravedad ($9.81 m/s^2$)

y_c = Altura del nivel del agua cuando el flujo es crítico (m)

Fórmula 4. Ecuación de altura de agua expulsada sobre el obstáculo

$$H=h'-h \quad (4)$$

h' = Altura del nivel del agua en el obstáculo (m)

h = Altura del obstáculo (m)

H = Altura del agua que sale expulsada encima del obstáculo (m)

Fórmula 5. Ecuación del área transversal del flujo en la sección 1

$$A_1=y_1*b \quad (5)$$

b = Ancho del canal (m)

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

A_1 = Área transversal del flujo en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m²)

Fórmula 6. Ecuación del área transversal del flujo en la sección 2

$$A_2=y_2*b \quad (6)$$

b = Ancho del canal (m)

y_2 = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

A_2 = Área transversal del flujo en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m²)

Fórmula 7. Ecuación de la velocidad del agua en la sección 1

$$V_1=\frac{Q}{A_1} \quad (7)$$

Q = Caudal del flujo (m³/s)

V_1 = Velocidad del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m/s)

A_1 = Área transversal del flujo en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m²)

Fórmula 8. Ecuación de la velocidad del agua en la sección 2

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} \quad (8)$$

Q = Caudal del flujo (m^3/s)

V_2 = Velocidad del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m/s)

A_2 = Área transversal del flujo en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m^2)

Fórmula 9. Ecuación del Número de Froude de la sección 1

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot y_1}} \quad (9)$$

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

F_1 = Número de Froude de la sección 1 (Antes del resalto hidráulico)

V_1 = Velocidad del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m/s)

g = Valor de la gravedad (9.81 m/s^2)

Fórmula 10. Ecuación del Número de Froude de la sección 2

$$F_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g \cdot y_2}} \quad (10)$$

y_2 = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

F_2 = Número de Froude de la sección 2 (Después del resalto hidráulico)

V_2 = Velocidad del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m/s)

g = Valor de la gravedad (9.81 m/s^2)

Fórmula 11. Ecuación de la energía específica en la sección 1

$$E_1 = y_1 + \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g} \quad (11)$$

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

V_1 = Velocidad del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m/s)

g = Valor de la gravedad (9.81 m/s²)

E_1 = Energía específica en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

Fórmula 12. Ecuación de la energía específica en la sección 2

$$E_2 = y_2 + \frac{(V_2)^2}{2 \cdot g} \quad (12)$$

y_2 = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

V_2 = Velocidad del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m/s)

g = Valor de la gravedad (9.81 m/s²)

E_2 = Energía específica en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

Fórmula 13. Ecuación de la pérdida de energía en el resalto hidráulico

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (13)$$

ΔE = Pérdida de energía en el resalto hidráulico (m)

E_1 = Energía específica en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

E_2 = Energía específica en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

Fórmula 14. Ecuación de la eficiencia del resalto hidráulico

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{y_2 + \frac{(V_2)^2}{2 \cdot g}}{y_1 + \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g}} \quad (14)$$

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

y_2 = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

V_1 = Velocidad del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m/s)

V_2 = Velocidad del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m/s)

g = Valor de la gravedad (9.81 m/s²)

E_1 = Energía específica en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

E_2 = Energía específica en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

E_2/E_1 = Eficiencia del resalto hidráulico

Fórmula 15. Ecuación de la altura del resalto hidráulico

$$hr = y_2 - y_1 \quad (15)$$

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

y_2 = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

hr = Altura del resalto hidráulico (m)

Fórmula 16. Ecuación de longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula de Smetana

$$L_1 = 6 \cdot (y_2 - y_1) \quad (16)$$

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

y_2 = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

L_1 = Longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula de Smetana (m)

Fórmula 17. Ecuación de longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula de Safránez

$$L_2 = 5.9 * (y_1 * F_1) \quad (17)$$

F_1 = Número de Froude de la sección 1 (Antes del resalto hidráulico)

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

L_2 = Longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula de Safránez (m)

Fórmula 18. Ecuación de longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula de Einwachter

$$L_3 = 8.3 * y_1 * (F_1 - 1) \quad (18)$$

F_1 = Número de Froude de la sección 1 (Antes del resalto hidráulico)

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

L_3 = Longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula de Einwachter (m)

Fórmula 19. Ecuación de longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula de Wóycicki

$$L_4 = (y_2 - y_1) * \left(8 - \frac{0.05 * y_2}{y_1} \right) \quad (19)$$

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

y_2 = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

L_4 = Longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula de Wóycicki (m)

Fórmula 20. Ecuación de longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula de Chertusov

$$L_5 = 10.3 * y_1 * (F_1 - 1)^{0.81} \quad (20)$$

F_1 = Número de Froude de la sección 1 (Antes del resalto hidráulico)

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

L_5 = Longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula de Chertusov (m)

Fórmula 21. Ecuación de longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula de la USBR

$$L_6 = 6.9 * (y_2 - y_1) \quad (21)$$

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

y_2 = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

L_6 = Longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula de la USBR (m)

Fórmula 22. Ecuación del error absoluto de la longitud del resalto hidráulico

$$\Delta L_n = |L_n - L| \quad (22)$$

L_n = Longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula **n** (m)

L = Longitud del resalto hidráulico medido en campo (m)

ΔL_n = Error absoluto entre la longitud del resalto hidráulico calculada por la fórmula **n** y la medida en campo (m)

Fórmula 23. Ecuación del error porcentual de la longitud del resalto hidráulico

$$EL = \frac{\Delta L_n}{L_n} * 100 \quad (23)$$

EL = Error porcentual entre la longitud del resalto hidráulico medida en campo y la calculada por fórmula que más se le asemeje (%)

L_n = Longitud del resalto hidráulico calculado por la fórmula **n** (m)

ΔL_n = Error absoluto entre la longitud del resalto hidráulico calculada por la fórmula **n** y la medida en campo (m)

Fórmula 24. Ecuación de la altura del nivel del agua en la sección 2 calculada con la fórmula general

$$y_2FG = y_1 * \frac{1}{2} * \left(\sqrt{1 + 8 * (F_1)^2} - 1 \right) \quad (24)$$

F_1 = Número de Froude de la sección 1 (Antes del resalto hidráulico)

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

y_2FG = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) calculada con la fórmula general del resalto hidráulico (m)

Fórmula 25. Ecuación del error absoluto de la altura del resalto hidráulico

$$\Delta y_2 = |y_2FG - y_2| \quad (25)$$

Δy_2 = Error absoluto entre la altura medida y calculada del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

y_2 = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

y_2FG = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) calculada con la fórmula general del resalto hidráulico (m)

Fórmula 26. Ecuación del error porcentual de la altura del resalto hidráulico

$$E_{y_2} = \frac{\Delta y_2}{y_2 FG} * 100 \quad (26)$$

E_{y_2} = Error porcentual entre la altura medida y calculada del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (%)

Δy_2 = Error absoluto entre la altura medida y calculada del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

$y_2 FG$ = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) calculada con la fórmula general del resalto hidráulico (m)

Fórmula 27. Ecuación del perímetro mojado del agua en la sección 1

$$P_{m_1} = b + 2*y_1 \quad (27)$$

P_{m_1} = Perímetro mojado del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

b = Ancho del canal (m)

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

Fórmula 28. Ecuación del perímetro mojado del agua en la sección 2

$$P_{m_2} = b + 2*y_2 \quad (28)$$

P_{m_2} = Perímetro mojado del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

b = Ancho del canal (m)

y_2 = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

Fórmula 29. Ecuación del radio hidráulico del flujo en la sección 1

$$R_1 = \frac{A_1}{Pm_1} \quad (29)$$

R_1 = Radio hidráulico del flujo en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

A_1 = Área transversal del flujo en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m²)

Pm_1 = Perímetro mojado del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

Fórmula 30. Ecuación del radio hidráulico del flujo en la sección 2

$$R_2 = \frac{A_2}{Pm_2} \quad (30)$$

R_2 = Radio hidráulico del flujo en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

A_2 = Área transversal del flujo en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m²)

Pm_2 = Perímetro mojado del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico)

(m)

Fórmula 31. Ecuación del Número de Reynolds del flujo en la sección 1

$$Re_1 = \frac{V_1 * R_1}{\nu} \quad (31)$$

ν = Viscosidad cinemática (m²/s) (En el caso del agua a 20°C es 1.007 X 10⁻⁶ (m²/s)

R_1 = Radio hidráulico del flujo en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

V_1 = Velocidad del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m/s)

Re_1 = Número de Reynolds del flujo en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico)

(m)

Fórmula 32. Ecuación del Número de Reynolds del flujo en la sección 2

$$Re_2 = \frac{V_2 * R_2}{\nu} \quad (32)$$

ν = Viscosidad cinemática (m^2/s) (En el caso del agua a $20^\circ C$ es 1.007×10^{-6} (m^2/s))

R_2 = Radio hidráulico del flujo en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

V_2 = Velocidad del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m/s)

Re_2 = Número de Reynolds del flujo en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

Fórmula 33. Condición de aplicación de obstáculos como vertederos para la creación del resalto hidráulico (Figura 3.8)

$$y_3 < h' - 0.75 * h \quad (33)$$

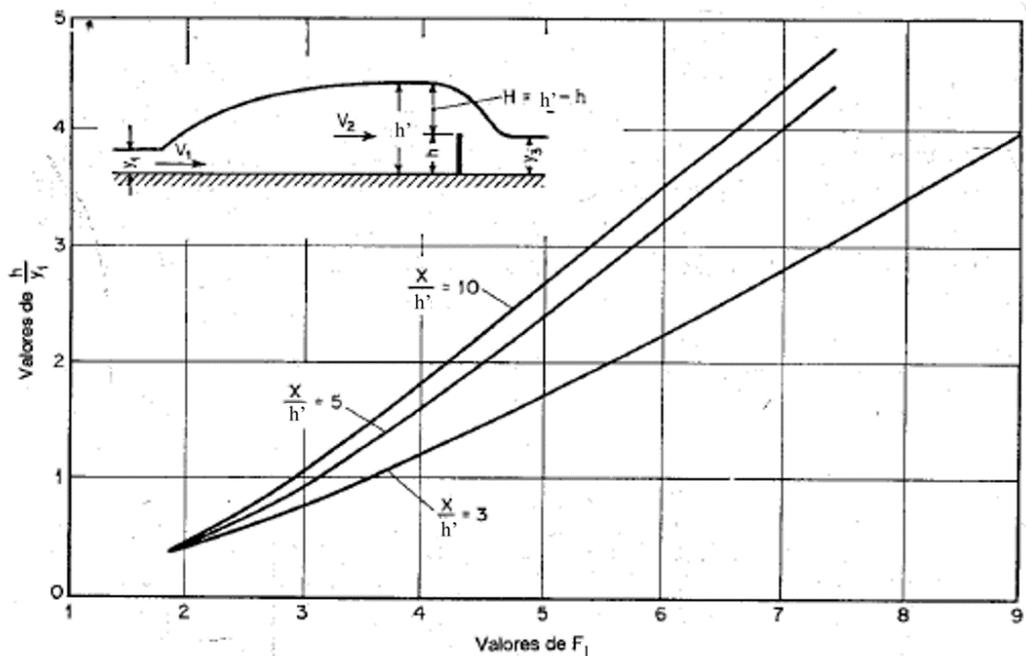


Figura 3.8 Diagrama de curvas de relaciones entre F_1 , h/y_1 y X/h' para un vertedero delgado

Fuente: (Chow, 1994)

y_3 = Altura del nivel del agua en la sección 3 (Después del vertedero) (m) = 0.00 m

h = Altura del vertedero (obstáculo) (m)

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

F_1 = Número de Froude de la sección 1 (Antes del resalto hidráulico)

X = Distancia desde el pie del resalto hasta el vertedero (m)

h' = Altura del nivel del agua en el vertedero (m)

H = Altura del agua que sale expulsada encima del vertedero (m)

Fórmula 34. Ecuación del error porcentual del caudal máximo de la bomba

$$EQ = \frac{Q \text{ máximo teórico} - Q \text{ máximo real}}{Q \text{ máximo teórico}} * 100 \quad (34)$$

EQ = Error porcentual entre el caudal máximo teórico y el caudal máximo real (%)

Q máximo teórico = Caudal máximo teórico de la bomba (8 lts/s)

Q máximo real = Caudal máximo real calculado en el experimento (lts/s)

Datos iniciales para la práctica

a = Apertura de compuerta (m)

t_n = Medida de tiempo n en que se llena la probeta (s)

h = Altura del vertedero (obstáculo) (m)

y_1 = Altura del nivel del agua en la sección 1 (Antes del resalto hidráulico) (m)

y_2 = Altura del nivel del agua en la sección 2 (Después del resalto hidráulico) (m)

X = Distancia desde el pie del resalto hasta el vertedero (m)

L = Longitud del resalto hidráulico medido en campo (m)

h' = Altura del nivel del agua en el vertedero (m)

PROCEDIMIENTO

El procedimiento para el desarrollo de la práctica de resalto hidráulico es el siguiente:

1. Llenar de agua el tanque de reserva hasta 10 cm de su altura total (Figura 3.9). Esto equivale a un total de 420 litros que son suficientes para abastecer a todo el canal en su máxima capacidad (300 litros).



Figura 3.9 Abastecimiento de agua del tanque de reserva hasta 10 cm de su altura total

Fuente: Elaboración propia

2. Conectar el cable de la bomba al enchufe más cercano y mantener el modelo físico lo más alejado posible del mismo para evitar la posibilidad de un cortocircuito (Figura 3.10).



Figura 3.10 Conexión eléctrica del cable de la bomba

Fuente: Elaboración propia

Sugerencia: considerar que la bomba trabaja a 110 voltios, no a 220 voltios, ya que a 220 voltios se usa para instalaciones en edificios con alturas mayores a 10 m, donde se necesita mayor potencia por parte de la bomba.

3. Utilizando el mango ubicado en la parte superior de la compuerta, girar para regular la altura de la misma hasta lograr un valor deseado. Para abrir la compuerta se debe girar en sentido contrario a las manecillas del reloj, mientras que para cerrar la compuerta se debe primero girar en sentido de las manecillas del reloj y luego empujar la compuerta hacia abajo (Figura 3.11).



Figura 3.11 Regulación de altura de compuerta estabilizadora de caudal

Fuente: Elaboración propia

Sugerencia: se recomienda que la apertura de la compuerta estabilizadora del caudal sea de 3 cm, ya que esta apertura es la única que genera una columna estable de agua antes de la compuerta con todos los caudales de la bomba. Para que la apertura de la compuerta sea 3 cm regular la misma hasta que la línea roja en la compuerta coincida con el borde superior del canal y comprobar con la cinta métrica (Figura 3.12).



Figura 3.12 Indicación de apertura de 3 cm en la compuerta

Fuente: Elaboración propia

4. Encender el interruptor de la bomba ubicado en la parte inferior del modelo (Figura 3.13), para que la misma succione el agua previamente colocada en el tanque.



Figura 3.13 Encendido del interruptor de bomba centrífuga

Fuente: Elaboración propia

5. Regular el caudal que entra al modelo con la válvula de esfera 1 colocándola en la posición 1. La válvula de esfera 2 no se regulará y se mantendrá abierta durante toda la práctica.

Nota: la válvula de esfera se encuentra abierta cuando su manija está paralela a la dirección de la tubería de desagüe, y cerrada cuando se encuentra perpendicular a la misma (Figura 3.14).



Figura 3.14 Válvula 1 cerrada en posición 1 y válvula 2 abierta (posición fija)

Fuente: Elaboración propia

Sugerencia: no se deben cerrar simultáneamente las dos válvulas ya que si ocurriese esto la bomba correría el riesgo de dañarse.

- Esperar hasta que el flujo en el canal se estabilice. Esto sucede cuando la altura del flujo antes de la compuerta se encuentra estable (Figura 3.15).



Figura 3.15 Altura de columna de agua estable antes de compuerta

Fuente: Elaboración propia

- Utilizando la probeta y el cronómetro, tomar 3 medidas de tiempo en que se llena la misma y anotar dichos valores en la ficha de recolección de datos (Figura 3.16).



Figura 3.16 Toma de tiempo en que la probeta se llena de agua

Fuente: Elaboración propia

- Colocar el obstáculo de menor medida al final del canal para generar el primer resalto hidráulico (Figura 3.17).



Figura 3.17 Colocación del obstáculo de menor medida al final del canal

Fuente: Elaboración propia

- Esperar a que el resalto hidráulico generado se mantenga en una posición fija y dibujar su borde con el marcador (Figura 3.18). Si el resalto es libre continuar con la práctica o en el caso de que se encuentre sumergido en la compuerta (Figura 3.19) continuar con la siguiente posición de la válvula.

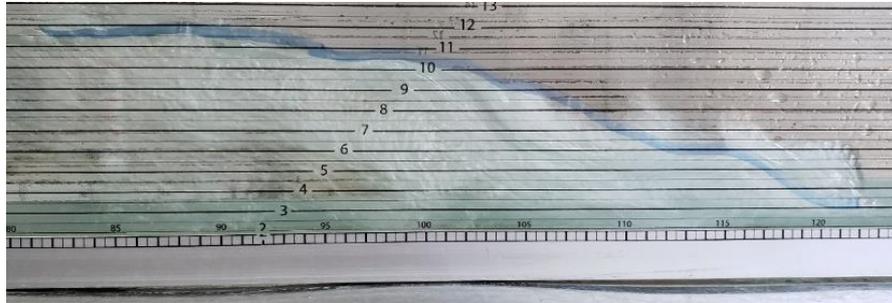


Figura 3.18 Resalto hidráulico libre con su borde dibujado con marcador

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.19 Resalto hidráulico sumergido en la compuerta

Fuente: Elaboración propia

- Utilizar los sellos de medida en los extremos del canal para medir y_1 , y_2 (Figura 3.20), y h' (Figura 3.21); y utilizar la cinta métrica para medir L (Figura 3.22) y X (Figura 3.23) del resalto hidráulico generado y anotar los mismos en la ficha de recolección de datos.

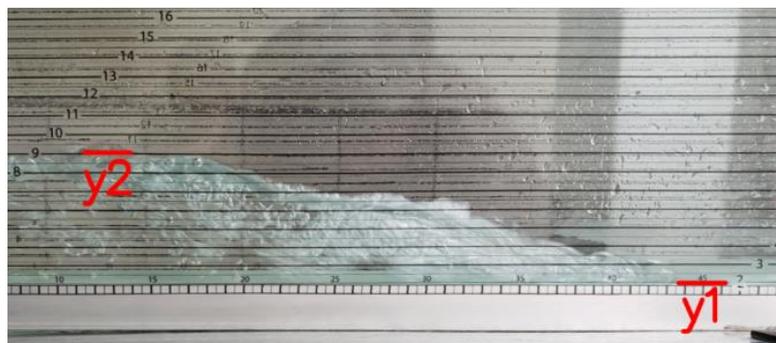


Figura 3.20 Medición de y_1 y y_2 por medio de los sellos de medición

Fuente: Elaboración propia

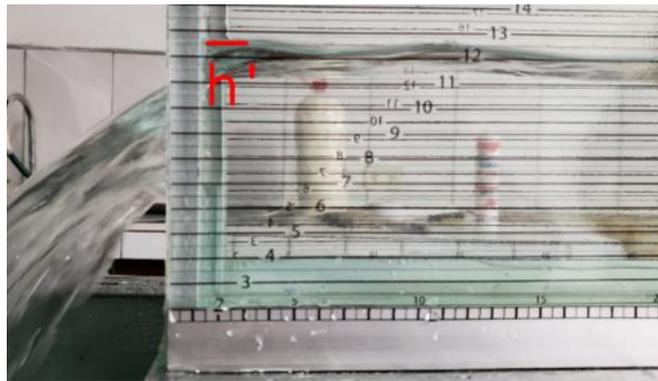


Figura 3.21 Medición de h' por medio de los sellos de medición

Fuente: Elaboración propia

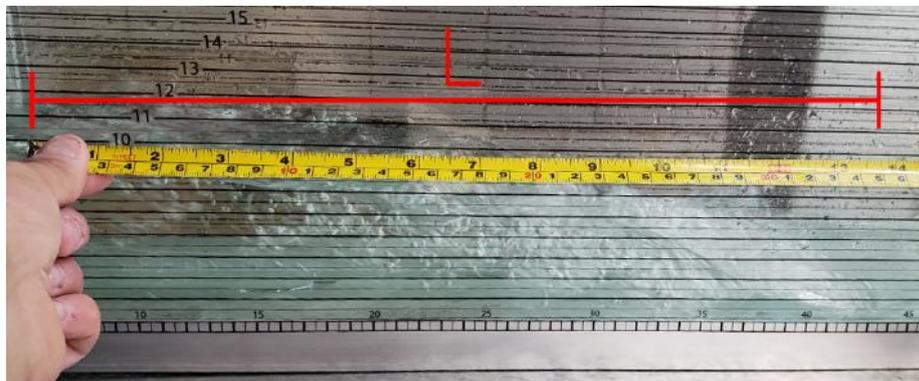


Figura 3.22 Medición de L por medio de la cinta métrica

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.23 Medición de X por medio de la cinta métrica

Fuente: Elaboración propia

11. Retirar el obstáculo, colocar el siguiente en medida y repetir los pasos del 9 al 10 (Figura 3.24). Hacer esto con cada uno de los obstáculos.

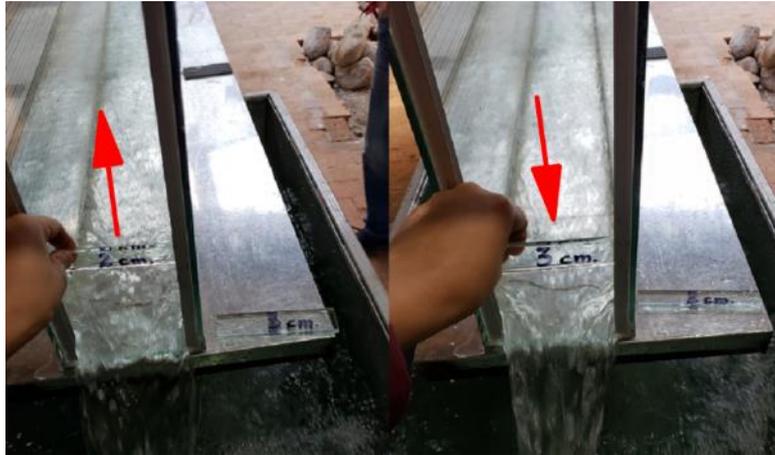


Figura 3.24 Reemplazo del obstáculo analizado por el que le sigue en medida

Fuente: Elaboración propia

12. Cambiar la válvula de esfera a la posición 2 y con el nuevo caudal repetir los pasos del 6 al 11 (Figura 3.25). Hacer esto con las posiciones restantes en la válvula de esfera.



Figura 3.25 Válvula 1 en posición 2

Fuente: Elaboración propia

13. Apagar la bomba y vaciar el tanque de reserva.
14. Escribir los datos de la ficha de recolección de datos en la ficha de resultados.
15. En la ficha de resultados ir a los datos de la posición 1.

16. Usando la fórmula 1 calcular el tiempo promedio (t_p) de los 3 tiempos tomados en campo.
17. Usando la fórmula 2 calcular el caudal (Q).
18. Usando la fórmula 3 calcular la altura de flujo crítico (y_c).
19. Ir a los datos del resalto hidráulico con el primer obstáculo.
20. Usando la fórmula 4 calcular la altura del agua que sale expulsada por encima del obstáculo (H).
21. Usando las fórmulas 5 y 6 calcular el área en cada sección del resalto hidráulico (A_1 y A_2).
22. Usando las fórmulas 7 y 8 calcular la velocidad del flujo en cada sección del resalto hidráulico (V_1 y V_2).
23. Usando las fórmulas 9 y 10 calcular el Número de Froude en cada sección del resalto hidráulico (F_1 y F_2).
24. Usando las fórmulas 11 y 12 calcular la energía específica en cada sección del resalto hidráulico (E_1 y E_2).
25. Usando la fórmula 13 calcular la pérdida de energía del resalto hidráulico (ΔE).
26. Usando la fórmula 14 calcular la eficiencia del resalto hidráulico (E_2/E_1).
27. Usando la fórmula 15 calcular la altura del resalto hidráulico (h_r).
28. Usando las fórmulas 16, 17, 18, 19, 20 y 21 calcular la longitud del resalto hidráulico ($L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6$) con las diferentes fórmulas establecidas.

29. Usando la fórmula 22 calcular el error absoluto ($\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3, \Delta L_4, \Delta L_5, \Delta L_6$) entre la longitud medida en campo y las calculadas con las diferentes fórmulas.
30. Determinar cuál de las fórmulas establecidas de la longitud del resalto se aproxima más a la longitud medida en campo.
31. Usando la fórmula 23 calcular el error porcentual (EL) que existe entre la longitud medida y la longitud calculada que más se le aproxime.
32. Usando la fórmula 24 calcular la altura final del resalto hidráulico (y_2FG) utilizando la fórmula general del resalto hidráulico.
33. Usando la fórmula 25 calcular el error absoluto (Δy_2) entre la altura final del resalto medida en campo y la calculada con la fórmula general del resalto hidráulico.
34. Usando la fórmula 26 calcular el error porcentual (Ey_2) entre la altura final del resalto medida en campo y la calculada con la fórmula general del resalto hidráulico.
35. Determinar el tipo de resalto hidráulico.
36. Determinar el tipo de flujo en cada una de las secciones del resalto hidráulico.
37. Usando las fórmulas 27 y 28 calcular el perímetro mojado en cada una de las secciones del resalto hidráulico (Pm_1 y Pm_2).
38. Usando las fórmulas 29 y 30 calcular el radio hidráulico en cada una de las secciones del resalto hidráulico (R_1 y R_2).
39. Usando las fórmulas 31 y 32 calcular el Número de Reynolds en cada una de las secciones del resalto hidráulico (Re_1 y Re_2).
40. Determinar el tipo de régimen en cada una de las secciones del resalto hidráulico.

41. Usando la fórmula 33 comprobar que esta condición se cumple para poder aplicar el diagrama de curvas de resalto hidráulico con vertedero delgado.

Nota: esta condición siempre se cumplirá en esta práctica de laboratorio, ya que posterior al obstáculo que funciona como vertedero no existe prolongación del canal sino el agua cae directamente en el tanque de reserva.

42. Calcular X/h' y h/y_1 .

43. Utilizar los datos de F_1 y h/y_1 como coordenadas de un punto en el diagrama de curvas de resalto hidráulico con vertedero delgado.

44. Interpolan la curva obtenida X/h' en el diagrama de curvas de resalto hidráulico con vertedero delgado.

45. Comparar la ubicación del punto ($F_1; h/y_1$) con la curva X/h' y determinar si el punto se encuentra dentro de la curva, arriba y a la izquierda o abajo y a la derecha de la misma.

46. Ir a los datos del resalto hidráulico obtenidos con el obstáculo siguiente en medida y repetir los pasos 20 al 45. Hacer esto con los datos del resalto hidráulico tomados para cada obstáculo de la posición actual.

47. Ir a los datos de la posición 2 y repetir los pasos 16 al 46. Hacer esto con los datos de las posiciones restantes.

48. Usando la fórmula 34 calcular el error porcentual entre el caudal máximo teórico y el caudal máximo real medido en campo (EQ).

49. Determinar el número de veces y porcentaje en que cada uno de los obstáculos produjo un resalto hidráulico libre.

50. Determinar cuántos resaltos hidráulicos libres y sumergidos se dieron en total y el porcentaje de cada uno.
51. Determinar el número de veces que cada fórmula de longitud del resalto hidráulico fue la más aproximada a la longitud medida en campo y calcular el porcentaje de cada una de ellas.
52. Determinar cuáles fueron los tipos de resalto hidráulico según su Número de Froude que se produjeron, el número y porcentaje de veces en que se dieron.
53. Realizar una tabla resumen con los rangos de valores de los términos más relevantes (y_1 , y_2 , L , X , h' , Q , y_c , H , V_1 , V_2 , F_1 , F_2 , E_1 , E_2 , ΔE , E_2/E_1 , h_r , ΔL , EL , Δy_2 , E_{y_2} , Re_1 , Re_2).
54. Contestar las preguntas del cuestionario de la práctica.

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

a (m)							
Tiempos		h (m)	y1 (m)	y2 (m)	L (m)	X (m)	h' (m)
t1 (s)		0.02					
		0.03					
		0.04					
		0.05					
t2 (s)		0.06					
		0.07					
		0.08					
		0.09					
t3 (s)		0.10					
		0.11					
		0.12					
		0.13					
Tiempos		h (m)	y1 (m)	y2 (m)	L (m)	X (m)	h' (m)
t1 (s)		0.02					
		0.03					
		0.04					
		0.05					
t2 (s)		0.06					
		0.07					
		0.08					
		0.09					
t3 (s)		0.10					
		0.11					
		0.12					
		0.13					
Tiempos		h (m)	y1 (m)	y2 (m)	L (m)	X (m)	h' (m)
t1 (s)		0.02					
		0.03					
		0.04					
		0.05					
t2 (s)		0.06					
		0.07					
		0.08					
		0.09					
t3 (s)		0.10					
		0.11					
		0.12					
		0.13					
Tiempos		h (m)	y1 (m)	y2 (m)	L (m)	X (m)	h' (m)
t1 (s)		0.02					
		0.03					
		0.04					
		0.05					
t2 (s)		0.06					
		0.07					
		0.08					
		0.09					
t3 (s)		0.10					
		0.11					
		0.12					
		0.13					

Figura 3.26 Ficha de recolección de datos

Fuente: Elaboración propia

FICHA DE RESULTADOS

CARACTERISTICAS DEL EXPERIMENTO		CARACTERISTICAS DEL RESALTO HIDRAULICO MEDIDAS						CARACTERISTICAS DEL RESALTO HIDRAULICO CALCULADAS															
Datos		h (m)	y1 (m)	y2 (m)	L (m)	X (m)	h' (m)	tp (s)	Q (lts/s)	yc (m)	H (m)	A1 (m2)	A2(m2)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	F1	F2	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)	E2/E1	hr (m)	
Vp (m3)		0.02																					
b (m)		0.03																					
v (m2/s)		0.04																					
a (m)		0.05																					
Tiempos		0.06																					
		0.07																					
t1 (s)		0.08																					
		0.09																					
t2 (s)		0.10																					
		0.11																					
t3 (s)		0.12																					
		0.13																					

LONGITUD DEL RESALTO HIDRAULICO CALCULADA															y2 CALCULADA		
h (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	L5 (m)	L6 (m)	ΔL1 (m)	ΔL2 (m)	ΔL3 (m)	ΔL4 (m)	ΔL5 (m)	ΔL6 (m)	L aprox	EL (%)	y2 FG (m)	Δy2 (m)	Ey2 (%)
0.02																	
0.03																	
0.04																	
0.05																	
0.06																	
0.07																	
0.08																	
0.09																	
0.10																	
0.11																	
0.12																	
0.13																	

CLASIFICACION DEL RESALTO, FLUJO Y REGIMEN EN EL RESALTO												COMPROBACION DE RESALTO CONTROLADO POR OBSTACULO			
h (m)	Tipo Resalto	Tipo de Flujo 1	Tipo de Flujo 2	Pm1 (m)	Pm2 (m)	R1 (m)	R2 (m)	Re1	Re2	Tipo de Regimen 1	Tipo de Regimen 2	h/y1	X/h'	F1	Posicion en curva
0.02															
0.03															
0.04															
0.05															
0.06															
0.07															
0.08															
0.09															
0.10															
0.11															
0.12															
0.13															

Figura 85 Ficha de resultados

Fuente: Elaboración propia

CUESTIONARIO

El cuestionario con las preguntas de razonamiento para contestar posterior a la práctica es el siguiente:

1. Visualmente, ¿puede notar la diferencia entre los diferentes tipos de resalto hidráulico generados en la práctica?
2. ¿Cuáles son las fórmulas de longitud de resalto que mejor y peor se asemejan a lo medido en laboratorio?
3. ¿Existen errores considerables entre los datos tomados en laboratorio para y_2 , frente a las fórmulas teóricas? De ser así, ¿cuál es la razón principal por la que esto ocurre?
4. En la Ingeniería Civil, ¿qué aplicaciones tienen los resaltos hidráulicos?
5. ¿Los resaltos hidráulicos generados naturalmente pueden generar problemas en los canales?
6. ¿Qué finalidad tienen los obstáculos utilizados en la práctica?
7. ¿Para qué se utiliza la compuerta de altura regulable en el canal?
8. ¿Qué relación existe entre el caudal que ingresa al canal y las alturas en resalto hidráulico?
9. ¿Qué particularidad existe en la pérdida de energía? Explique la causa de la misma.
10. ¿Qué relación existe entre la pérdida de energía y el caudal?
11. ¿Qué relación existe entre la pérdida de energía y los obstáculos utilizados?

12. ¿Qué relación existe entre la eficiencia del resalto y el caudal?
13. ¿Qué relación existe entre la eficiencia del resalto y los obstáculos utilizados?
14. ¿Qué relación existe entre h_r y los obstáculos utilizados?
15. Mientras aumenta el caudal, ¿qué ocurre con las h_r de los resaltos?
16. ¿Cuál es la diferencia entre un resalto sumergido y uno libre?
17. ¿Qué obstáculos fueron innecesarios para la recolección de datos de la práctica? ¿Por qué?
18. ¿Qué relación existe entre el caudal y los obstáculos utilizados para generar el resalto? Explíquela.
19. ¿Qué relación existe entre EL , y h ? Explíquela.
20. ¿Qué puede apreciar conforme a los números de Reynolds calculados en la práctica? ¿Qué tipo de régimen predomina?
21. ¿Concuerda lo visto en la práctica con la teoría sobre el diagrama de curvas de relaciones entre F_1 , h/y_1 y X/h' para un vertedero delgado?
22. ¿Qué relación existe entre el tipo de resalto generado y el obstáculo utilizado?
23. ¿De qué depende el tipo de resalto hidráulico que se produzca? Explique.

CONCLUSIONES

La práctica del resalto hidráulico diseñada, sirve como un recurso de apoyo para los docentes y estudiantes que han tratado previamente el tema en cuestión. Les ayuda a entender cómo se visualiza un resalto hidráulico en el campo y como difiere su comportamiento en cada caso.

Se construyó un modelo físico en el cual se puede producir gran cantidad de resaltos hidráulicos libres, los cuales se pueden analizar utilizando lo descrito en el marco teórico de este trabajo de investigación, para que los estudiantes de la Universidad del Azuay que realicen esta práctica de laboratorio visualicen las diferentes propiedades del resalto hidráulico.

Se elaboró una guía metodológica simple y eficaz, con la cual los estudiantes que realicen la práctica podrán seguir paso a paso lo descrito para generar los resaltos hidráulicos libres, dando uso del modelo físico y todos sus elementos.

Se creó una ficha de resultados práctica y ordenada, en la cual los estudiantes pueden anotar los datos de campo y calcular los términos necesarios de manera comprensiva, para que en su posterior análisis se pueda visualizar de manera clara como varían los diferentes elementos del resalto en cada una de las situaciones estudiadas.

La práctica de laboratorio es eficaz, ya que en la prueba de la misma se generaron resaltos hidráulicos libres en más del 50% de todas las experimentaciones aprovechando más del 90% del espacio destinado para ello, por lo que se asume que en el momento en que el docente y los estudiantes realicen la práctica, habrá un amplio rango de posibilidades de que ocurra un resalto hidráulico.

Las consecuencias más desfavorables del uso de los obstáculos fueron que en la mayoría de los casos entre las dos secciones del resalto se produjo un aumento de energía en lugar de una pérdida, y que existe un gran rango de error entre las alturas finales del resalto medidas y calculadas.

Entre todas las fórmulas de longitud del resalto planteadas, la más certera fue la de Smetana con un 26.47% de acierto mientras la de menos certeza fue la de Chertusov con un 8.82 %. Los errores más grandes entre las longitudes medidas y calculadas fueron de hasta 53.2 % en resaltos no formados completamente y hasta 20 % en resaltos completos.

A pesar de que la capacidad de la bomba tiene un error experimental de un 33.75 %, todos los caudales producidos por la misma produjeron un flujo supercrítico, necesario para que se genere el resalto hidráulico, por lo que se demuestra que la bomba escogida es la correcta.

Esta bomba generó dos tipos de resalto hidráulico: débil y oscilante. Esto depende del caudal generado por la bomba y del valor de y_1 , más no de la altura del obstáculo utilizado; por lo que siempre se tendrá el mismo tipo de resalto hidráulico en todos los casos analizados con la misma posición de la válvula 1.

A medida que crece el caudal sucede lo siguiente:

- Aumentan y_1 , y_2 , y_c , h_r , H y ΔE .
- Aumenta el número de obstáculos que producen resaltos libres, porque mientras mayor sea el caudal produce mayor fuerza que obliga al resalto a dirigirse hacia el obstáculo, por lo que se producen menos resaltos completamente formados longitudinalmente.
- Se producen resaltos de alturas más variadas, generados por los diferentes obstáculos en ese determinado caudal.
- Disminuye la eficiencia del resalto hidráulico.

A medida que se utilizan obstáculos de mayor medida se producen resaltos hidráulicos de mayor eficiencia, mayor altura, y de menor pérdida de energía.

RECOMENDACIONES

Tomando como referente los diferentes experimentos realizados, en los cuales se ha utilizado el modelo físico y sus diferentes elementos, se recomienda, que al momento de realizar la práctica de laboratorio, la apertura de la compuerta estabilizadora del caudal sea de 3 cm, ya que ésta apertura fue la única que generó una columna estable de agua antes de la compuerta con todos los caudales analizados en la práctica.

Se recomienda utilizar solamente los obstáculos de medidas 2 cm a 9 cm en el experimento, pues después de realizar la práctica estos fueron los únicos que generaron resaltos hidráulicos libres, que serán los que se analizarán en la ficha de resultados. Se recomienda utilizar el resto de obstáculos únicamente si de manera demostrativa se pretende observar resaltos hidráulicos sumergidos.

BIBLIOGRAFÍA

- Cassells Vigil, H. (2005). *Diseño de una guía metodológica para la elaboración de un plan de gestión ambiental a nivel institucional*. Managua: Universidad Nacional Agraria.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Santa Fé de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Luna Méndez, E. (2016). *Elaboración de guías prácticas de procesos metalúrgicos para el laboratorio de minas de la Universidad del Azuay*. Cuenca.
- Macián Pérez, J. F., Bayón, A., Vallés Morán, F. J., García Bartua, R., & López Jiménez, P. A. (2017). Caracterización experimental de resaltos hidráulicos estacionarios con alto número de Reynolds. *V Jornadas de Ingeniería del Agua*, 11.
- Manrique Andrade, V. A. (2013). *Comportamiento del resalto hidráulico en canales con pendiente y sección rectangular*. Bogota D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Marbello Pérez, R. V. (2005). *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Rodríguez Ruiz, P. (2008). *Hidráulica de canales*.
- Zucarelli, G. V., & Morresi, M. (s.f.). Flujo en canales abiertos: Caracterización en cursos de la provincia de Santa Fé, República Argentina. *Universidad Nacional del Litoral*, 13.

ANEXOS

CARACTERÍSTICAS DEL EXPERIMENTO		CARACTERÍSTICAS DEL RESALTO HIDRAULICO MEDIDAS							CARACTERÍSTICAS DEL RESALTO HIDRAULICO CALCULADAS													
Vp (m3)	0.018																					
b (m)	0.15																					
v (m2/s)	1.007E-06																					
a (m)	0.03																					
Tiempos	h (m)	y1 (m)	y2 (m)	L (m)	X (m)	h' (m)	tp (s)	Q (lts/s)	yc (m)	H (m)	A1 (m2)	A2(m2)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	F1	F2	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)	E2/E1	hr (m)	
t1 (s)	3.48	0.02	0.025	0.100	0.180	0.180	0.100	3.40	5.30	0.0503	0.080	0.0038	0.0150	1.4132	0.3533	2.8535	0.3567	0.1268	0.1064	0.0204	0.8389	0.075
t2 (s)	3.40	0.03	0.025	0.100	0.280	0.280	0.100	3.40	5.30	0.0503	0.070	0.0038	0.0150	1.4132	0.3533	2.8535	0.3567	0.1268	0.1064	0.0204	0.8389	0.075
t3 (s)	3.31	0.04	0.025	0.110	0.390	0.390	0.110	3.40	5.30	0.0503	0.070	0.0038	0.0165	1.4132	0.3212	2.8535	0.3092	0.1268	0.1153	0.0115	0.9091	0.085
		0.05	0.025	0.125	0.600	0.840	0.130	3.40	5.30	0.0503	0.080	0.0038	0.0188	1.4132	0.2826	2.8535	0.2552	0.1268	0.1291	-0.0023	1.0180	0.100
		0.06	0.025	0.130	0.640	1.190	0.140	3.40	5.30	0.0503	0.080	0.0038	0.0195	1.4132	0.2718	2.8535	0.2406	0.1268	0.1338	-0.0070	1.0551	0.105
		0.07	0.025	0.135	0.860	1.670	0.150	3.40	5.30	0.0503	0.080	0.0038	0.0203	1.4132	0.2617	2.8535	0.2274	0.1268	0.1385	-0.0117	1.0923	0.110
		0.08	0.025	0.130	0.770	2.130	0.160	3.40	5.30	0.0503	0.080	0.0038	0.0195	1.4132	0.2718	2.8535	0.2406	0.1268	0.1338	-0.0070	1.0551	0.105
		0.09	0.025	0.140	0.590	2.490	0.170	3.40	5.30	0.0503	0.080	0.0038	0.0210	1.4132	0.2523	2.8535	0.2153	0.1268	0.1432	-0.0165	1.1298	0.115
Tiempos	h (m)	y1 (m)	y2 (m)	L (m)	X (m)	h' (m)	tp (s)	Q (lts/s)	yc (m)	H (m)	A1 (m2)	A2(m2)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	F1	F2	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)	E2/E1	hr (m)	
t1 (s)	3.75	0.02	0.025	0.090	0.200	0.200	0.090	3.79	4.75	0.0467	0.070	0.0038	0.0135	1.2654	0.3515	2.5551	0.3741	0.1066	0.0963	0.0103	0.9033	0.065
t2 (s)	3.86	0.03	0.025	0.100	0.280	0.280	0.100	3.79	4.75	0.0467	0.070	0.0038	0.0150	1.2654	0.3163	2.5551	0.3194	0.1066	0.1051	0.0015	0.9858	0.075
t3 (s)	3.77	0.04	0.025	0.115	0.450	0.450	0.115	3.79	4.75	0.0467	0.075	0.0038	0.0173	1.2654	0.2751	2.5551	0.2590	0.1066	0.1189	-0.0122	1.1149	0.090
		0.05	0.025	0.120	0.520	0.920	0.130	3.79	4.75	0.0467	0.080	0.0038	0.0180	1.2654	0.2636	2.5551	0.2430	0.1066	0.1235	-0.0169	1.1588	0.095
		0.06	0.025	0.120	0.520	1.350	0.140	3.79	4.75	0.0467	0.080	0.0038	0.0180	1.2654	0.2636	2.5551	0.2430	0.1066	0.1235	-0.0169	1.1588	0.095
		0.07	0.025	0.125	0.660	1.820	0.150	3.79	4.75	0.0467	0.080	0.0038	0.0188	1.2654	0.2531	2.5551	0.2285	0.1066	0.1283	-0.0217	1.2031	0.100
		0.08	0.025	0.125	0.480	2.290	0.160	3.79	4.75	0.0467	0.080	0.0038	0.0188	1.2654	0.2531	2.5551	0.2285	0.1066	0.1283	-0.0217	1.2031	0.100
		0.09	0.025	0.130	0.530	2.600	0.170	3.79	4.75	0.0467	0.080	0.0038	0.0195	1.2654	0.2433	2.5551	0.2155	0.1066	0.1330	-0.0264	1.2477	0.105
Tiempos	h (m)	y1 (m)	y2 (m)	L (m)	X (m)	h' (m)	tp (s)	Q (lts/s)	yc (m)	H (m)	A1 (m2)	A2(m2)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	F1	F2	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)	E2/E1	hr (m)	
t1 (s)	4.86	0.02	0.025	0.080	0.220	0.220	0.080	4.94	3.65	0.0392	0.060	0.0038	0.0120	0.9723	0.3038	1.9634	0.3430	0.0732	0.0847	-0.0115	1.1574	0.055
t2 (s)	5.09	0.03	0.025	0.080	0.270	0.490	0.090	4.94	3.65	0.0392	0.060	0.0038	0.0120	0.9723	0.3038	1.9634	0.3430	0.0732	0.0847	-0.0115	1.1574	0.055
t3 (s)	4.86	0.04	0.025	0.085	0.260	1.060	0.100	4.94	3.65	0.0392	0.060	0.0038	0.0128	0.9723	0.2860	1.9634	0.3132	0.0732	0.0892	-0.0160	1.2184	0.060
		0.05	0.025	0.090	0.400	1.540	0.115	4.94	3.65	0.0392	0.065	0.0038	0.0135	0.9723	0.2701	1.9634	0.2874	0.0732	0.0937	-0.0205	1.2806	0.065
		0.06	0.025	0.090	0.430	1.940	0.125	4.94	3.65	0.0392	0.065	0.0038	0.0135	0.9723	0.2701	1.9634	0.2874	0.0732	0.0937	-0.0205	1.2806	0.065
		0.07	0.025	0.095	0.530	2.490	0.135	4.94	3.65	0.0392	0.065	0.0038	0.0143	0.9723	0.2559	1.9634	0.2650	0.0732	0.0983	-0.0252	1.3437	0.070
		0.08	0.025	0.095	0.520	2.950	0.145	4.94	3.65	0.0392	0.065	0.0038	0.0143	0.9723	0.2559	1.9634	0.2650	0.0732	0.0983	-0.0252	1.3437	0.070
Tiempos	h (m)	y1 (m)	y2 (m)	L (m)	X (m)	h' (m)	tp (s)	Q (lts/s)	yc (m)	H (m)	A1 (m2)	A2(m2)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	F1	F2	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)	E2/E1	hr (m)	
t1 (s)	5.98	0.02	0.020	0.065	0.260	0.260	0.070	5.99	3.00	0.0344	0.050	0.0030	0.0098	1.0011	0.3080	2.2601	0.3858	0.0711	0.0698	0.0012	0.9825	0.045
t2 (s)	5.90	0.03	0.020	0.070	0.230	0.770	0.085	5.99	3.00	0.0344	0.055	0.0030	0.0105	1.0011	0.2860	2.2601	0.3452	0.0711	0.0742	-0.0031	1.0434	0.050
t3 (s)	6.10	0.04	0.020	0.075	0.460	1.320	0.095	5.99	3.00	0.0344	0.055	0.0030	0.0113	1.0011	0.2670	2.2601	0.3112	0.0711	0.0786	-0.0076	1.1062	0.055
		0.05	0.020	0.075	0.370	1.840	0.105	5.99	3.00	0.0344	0.055	0.0030	0.0113	1.0011	0.2670	2.2601	0.3112	0.0711	0.0786	-0.0076	1.1062	0.055
		0.06	0.020	0.080	0.490	2.270	0.115	5.99	3.00	0.0344	0.055	0.0030	0.0120	1.0011	0.2503	2.2601	0.2825	0.0711	0.0832	-0.0121	1.1704	0.060
		0.07	0.020	0.075	0.320	2.800	0.125	5.99	3.00	0.0344	0.055	0.0030	0.0113	1.0011	0.2670	2.2601	0.3112	0.0711	0.0786	-0.0076	1.1062	0.055
Tiempos	h (m)	y1 (m)	y2 (m)	L (m)	X (m)	h' (m)	tp (s)	Q (lts/s)	yc (m)	H (m)	A1 (m2)	A2(m2)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	F1	F2	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)	E2/E1	hr (m)	
t1 (s)	7.47	0.02	0.020	0.060	0.160	0.390	0.065	7.42	2.42	0.0299	0.045	0.0030	0.0090	0.8083	0.2694	1.8247	0.3512	0.0533	0.0637	-0.0104	1.1952	0.040
t2 (s)	7.31	0.03	0.020	0.065	0.330	1.000	0.080	7.42	2.42	0.0299	0.050	0.0030	0.0098	0.8083	0.2487	1.8247	0.3114	0.0533	0.0682	-0.0149	1.2787	0.045
t3 (s)	7.49	0.04	0.020	0.065	0.310	1.450	0.090	7.42	2.42	0.0299	0.050	0.0030	0.0098	0.8083	0.2487	1.8247	0.3114	0.0533	0.0682	-0.0149	1.2787	0.045
		0.05	0.020	0.060	0.240	2.020	0.100	7.42	2.42	0.0299	0.050	0.0030	0.0090	0.8083	0.2694	1.8247	0.3512	0.0533	0.0637	-0.0104	1.1952	0.040
		0.06	0.020	0.060	0.260	2.450	0.110	7.42	2.42	0.0299	0.050	0.0030	0.0090	0.8083	0.2694	1.8247	0.3512	0.0533	0.0637	-0.0104	1.1952	0.040

Anexo 1 Ficha de resultados de práctica ejemplo (Parte 1)

Fuente: Elaboración propia

LONGITUD DEL RESALTO HIDRAULICO CALCULADA	y2 CALCULADA
---	--------------

Smetana	Safranez	Einwachter	Woycicki	Chertusov	USBR												
L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	L5 (m)	L6 (m)	ΔL1 (m)	ΔL2 (m)	ΔL3 (m)	ΔL4 (m)	ΔL5 (m)	ΔL6 (m)	Laprox	EL (%)	y2 FG (m)	Δy2 (m)	Ey2 (%)	
0.45	0.42	0.38	0.59	0.42	0.52	0.27	0.24	0.20	0.41	0.24	0.34	Einwachter	53.20	0.089	0.011	12.16	
0.45	0.42	0.38	0.59	0.42	0.52	0.17	0.14	0.10	0.31	0.14	0.24	Einwachter	27.20	0.089	0.011	12.16	
0.51	0.42	0.38	0.66	0.42	0.59	0.12	0.03	0.01	0.27	0.03	0.20	Einwachter	1.40	0.089	0.021	23.37	
0.60	0.42	0.38	0.78	0.42	0.69	0.00	0.18	0.22	0.18	0.18	0.09	Smetana	0.00	0.089	0.036	40.20	
0.63	0.42	0.38	0.81	0.42	0.72	0.01	0.22	0.26	0.17	0.22	0.08	Smetana	1.59	0.089	0.041	45.81	
0.66	0.42	0.38	0.85	0.42	0.76	0.20	0.44	0.48	0.01	0.44	0.10	Woycicki	1.14	0.089	0.046	51.41	
0.63	0.42	0.38	0.81	0.42	0.72	0.14	0.35	0.39	0.04	0.35	0.05	Woycicki	5.25	0.089	0.041	45.81	
0.69	0.42	0.38	0.89	0.42	0.79	0.10	0.17	0.21	0.30	0.17	0.20	Smetana	14.49	0.089	0.051	57.02	
L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	L5 (m)	L6 (m)	ΔL1 (m)	ΔL2 (m)	ΔL3 (m)	ΔL4 (m)	ΔL5 (m)	ΔL6 (m)	Laprox	EL (%)	y2 FG (m)	Δy2 (m)	Ey2 (%)	
0.39	0.38	0.32	0.51	0.37	0.45	0.19	0.18	0.12	0.31	0.17	0.25	Einwachter	38.02	0.079	0.011	14.36	
0.45	0.38	0.32	0.59	0.37	0.52	0.17	0.10	0.04	0.31	0.09	0.24	Einwachter	13.23	0.079	0.021	27.07	
0.54	0.38	0.32	0.70	0.37	0.62	0.09	0.07	0.13	0.25	0.08	0.17	Safranez	16.67	0.079	0.036	46.13	
0.57	0.38	0.32	0.74	0.37	0.66	0.05	0.14	0.20	0.22	0.15	0.14	Smetana	8.77	0.079	0.041	52.48	
0.57	0.38	0.32	0.74	0.37	0.66	0.05	0.14	0.20	0.22	0.15	0.14	Smetana	8.77	0.079	0.041	52.48	
0.60	0.38	0.32	0.78	0.37	0.69	0.06	0.28	0.34	0.12	0.29	0.03	USBR	4.35	0.079	0.046	58.83	
0.60	0.38	0.32	0.78	0.37	0.69	0.12	0.10	0.16	0.30	0.11	0.21	Safranez	20.00	0.079	0.046	58.83	
0.63	0.38	0.32	0.81	0.37	0.72	0.10	0.15	0.21	0.28	0.16	0.19	Smetana	15.87	0.079	0.051	65.19	
L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	L5 (m)	L6 (m)	ΔL1 (m)	ΔL2 (m)	ΔL3 (m)	ΔL4 (m)	ΔL5 (m)	ΔL6 (m)	Laprox	EL (%)	y2 FG (m)	Δy2 (m)	Ey2 (%)	
0.33	0.29	0.20	0.43	0.25	0.38	0.11	0.07	0.02	0.21	0.03	0.16	Einwachter	10.06	0.058	0.022	37.85	
0.33	0.29	0.20	0.43	0.25	0.38	0.06	0.02	0.07	0.16	0.02	0.11	Safranez	6.77	0.058	0.022	37.85	
0.36	0.29	0.20	0.47	0.25	0.41	0.10	0.03	0.06	0.21	0.01	0.15	Chertusov	4.07	0.058	0.027	46.47	
0.39	0.29	0.20	0.51	0.25	0.45	0.01	0.11	0.20	0.11	0.15	0.05	Smetana	2.56	0.058	0.032	55.09	
0.39	0.29	0.20	0.51	0.25	0.45	0.04	0.14	0.23	0.08	0.18	0.02	USBR	4.12	0.058	0.032	55.09	
0.42	0.29	0.20	0.55	0.25	0.48	0.11	0.24	0.33	0.02	0.28	0.05	Woycicki	3.05	0.058	0.037	63.70	
0.42	0.29	0.20	0.55	0.25	0.48	0.10	0.23	0.32	0.03	0.27	0.04	Woycicki	4.88	0.058	0.037	63.70	
L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	L5 (m)	L6 (m)	ΔL1 (m)	ΔL2 (m)	ΔL3 (m)	ΔL4 (m)	ΔL5 (m)	ΔL6 (m)	Laprox	EL (%)	y2 FG (m)	Δy2 (m)	Ey2 (%)	
0.27	0.27	0.21	0.35	0.25	0.31	0.01	0.01	0.05	0.09	0.01	0.05	Safranez	2.51	0.055	0.010	18.82	
0.30	0.27	0.21	0.39	0.25	0.35	0.07	0.04	0.02	0.16	0.02	0.12	Chertusov	7.42	0.055	0.015	27.96	
0.33	0.27	0.21	0.43	0.25	0.38	0.13	0.19	0.25	0.03	0.21	0.08	Woycicki	7.05	0.055	0.020	37.10	
0.33	0.27	0.21	0.43	0.25	0.38	0.04	0.10	0.16	0.06	0.12	0.01	USBR	2.50	0.055	0.020	37.10	
0.36	0.27	0.21	0.47	0.25	0.41	0.13	0.22	0.28	0.02	0.24	0.08	Woycicki	4.70	0.055	0.025	46.24	
0.33	0.27	0.21	0.43	0.25	0.38	0.01	0.05	0.11	0.11	0.07	0.06	Smetana	3.03	0.055	0.020	37.10	
L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	L5 (m)	L6 (m)	ΔL1 (m)	ΔL2 (m)	ΔL3 (m)	ΔL4 (m)	ΔL5 (m)	ΔL6 (m)	Laprox	EL (%)	y2 FG (m)	Δy2 (m)	Ey2 (%)	
0.24	0.22	0.14	0.31	0.18	0.28	0.08	0.06	0.02	0.15	0.02	0.12	Chertusov	9.21	0.043	0.017	40.94	
0.27	0.22	0.14	0.35	0.18	0.31	0.06	0.11	0.19	0.02	0.15	0.02	USBR	6.28	0.043	0.022	52.68	
0.27	0.22	0.14	0.35	0.18	0.31	0.04	0.09	0.17	0.04	0.13	0.00	USBR	0.16	0.043	0.022	52.68	
0.24	0.22	0.14	0.31	0.18	0.28	0.00	0.02	0.10	0.07	0.06	0.04	Smetana	0.00	0.043	0.017	40.94	
0.24	0.22	0.14	0.31	0.18	0.28	0.02	0.04	0.12	0.05	0.08	0.02	USBR	5.80	0.043	0.017	40.94	

Anexo 2 Ficha de resultados de práctica ejemplo (Parte 2)

Fuente: Elaboración propia

CLASIFICACION DEL RESALTO, FLUJO Y REGIMEN EN EL RESALTO	COMPROBACION DE RESALTO CONTROLADO POR OBSTACULO
--	---

Tipo Resalto	Tipo de Flujo 1	Tipo de Flujo 2	Pm1 (m)	Pm2 (m)	R1 (m)	R2 (m)	Re1	Re2	Tipo de Regimen 1	Tipo de Regimen 2	F1	h/y1	X/h'	Posicion en curva
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.35	0.02	0.04	26312	15036	Turbulento	Turbulento	2.85	0.80	1.80	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.35	0.02	0.04	26312	15036	Turbulento	Turbulento	2.85	1.20	2.80	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.37	0.02	0.04	26312	14223	Turbulento	Turbulento	2.85	1.60	3.55	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.40	0.02	0.05	26312	13156	Turbulento	Turbulento	2.85	2.00	6.46	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.41	0.02	0.05	26312	12835	Turbulento	Turbulento	2.85	2.40	8.50	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.42	0.02	0.05	26312	12530	Turbulento	Turbulento	2.85	2.80	11.13	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.41	0.02	0.05	26312	12835	Turbulento	Turbulento	2.85	3.20	13.31	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.43	0.02	0.05	26312	12238	Turbulento	Turbulento	2.85	3.60	14.65	Arriba e izquierda
Tipo Resalto	Tipo de Flujo 1	Tipo de Flujo 2	Pm1 (m)	Pm2 (m)	R1 (m)	R2 (m)	Re1	Re2	Tipo de Regimen 1	Tipo de Regimen 2	F1	h/y1	X/y2	Posicion en curva
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.33	0.02	0.04	23561	14279	Turbulento	Turbulento	2.56	0.80	2.22	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.35	0.02	0.04	23561	13463	Turbulento	Turbulento	2.56	1.20	2.80	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.38	0.02	0.05	23561	12400	Turbulento	Turbulento	2.56	1.60	3.91	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.39	0.02	0.05	23561	12083	Turbulento	Turbulento	2.56	2.00	7.08	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.39	0.02	0.05	23561	12083	Turbulento	Turbulento	2.56	2.40	9.64	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.40	0.02	0.05	23561	11780	Turbulento	Turbulento	2.56	2.80	12.13	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.40	0.02	0.05	23561	11780	Turbulento	Turbulento	2.56	3.20	14.31	Arriba e izquierda
Oscilante	Supercritico	Subcritico	0.20	0.41	0.02	0.05	23561	11493	Turbulento	Turbulento	2.56	3.60	15.29	Arriba e izquierda
Tipo Resalto	Tipo de Flujo 1	Tipo de Flujo 2	Pm1 (m)	Pm2 (m)	R1 (m)	R2 (m)	Re1	Re2	Tipo de Regimen 1	Tipo de Regimen 2	F1	h/y1	X/y2	Posicion en curva
Debil	Supercritico	Subcritico	0.20	0.31	0.02	0.04	18104	11680	Turbulento	Turbulento	1.96	0.80	2.75	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.20	0.31	0.02	0.04	18104	11680	Turbulento	Turbulento	1.96	1.20	5.44	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.20	0.32	0.02	0.04	18104	11315	Turbulento	Turbulento	1.96	1.60	10.60	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.20	0.33	0.02	0.04	18104	10972	Turbulento	Turbulento	1.96	2.00	13.39	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.20	0.33	0.02	0.04	18104	10972	Turbulento	Turbulento	1.96	2.40	15.52	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.20	0.34	0.02	0.04	18104	10650	Turbulento	Turbulento	1.96	2.80	18.44	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.20	0.34	0.02	0.04	18104	10650	Turbulento	Turbulento	1.96	3.20	20.34	Arriba e izquierda
Tipo Resalto	Tipo de Flujo 1	Tipo de Flujo 2	Pm1 (m)	Pm2 (m)	R1 (m)	R2 (m)	Re1	Re2	Tipo de Regimen 1	Tipo de Regimen 2	F1	h/y1	X/y2	Posicion en curva
Debil	Supercritico	Subcritico	0.19	0.28	0.02	0.03	15697	10652	Turbulento	Turbulento	2.26	1.00	3.71	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.19	0.29	0.02	0.04	15697	10284	Turbulento	Turbulento	2.26	1.50	9.06	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.19	0.30	0.02	0.04	15697	9942	Turbulento	Turbulento	2.26	2.00	13.89	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.19	0.30	0.02	0.04	15697	9942	Turbulento	Turbulento	2.26	2.50	17.52	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.19	0.31	0.02	0.04	15697	9621	Turbulento	Turbulento	2.26	3.00	19.74	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.19	0.30	0.02	0.04	15697	9942	Turbulento	Turbulento	2.26	3.50	22.40	Arriba e izquierda
Tipo Resalto	Tipo de Flujo 1	Tipo de Flujo 2	Pm1 (m)	Pm2 (m)	R1 (m)	R2 (m)	Re1	Re2	Tipo de Regimen 1	Tipo de Regimen 2	F1	h/y1	X/y2	Posicion en curva
Debil	Supercritico	Subcritico	0.19	0.27	0.02	0.03	12673	8918	Turbulento	Turbulento	1.82	1.00	6.00	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.19	0.28	0.02	0.03	12673	8600	Turbulento	Turbulento	1.82	1.50	12.50	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.19	0.28	0.02	0.03	12673	8600	Turbulento	Turbulento	1.82	2.00	16.11	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.19	0.27	0.02	0.03	12673	8918	Turbulento	Turbulento	1.82	2.50	20.20	Arriba e izquierda
Debil	Supercritico	Subcritico	0.19	0.27	0.02	0.03	12673	8918	Turbulento	Turbulento	1.82	3.00	22.27	Arriba e izquierda

Anexo 3 Ficha de resultados de práctica ejemplo (Parte 3)

Fuente: Elaboración propia