

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO
DE DISIPADORES DE ENERGÍA ADAPTADOS A VERTEDEROS
TIPO CREAGER CON PENDIENTES VARIABLES
EN CONDICIONES DE LABORATORIO”**

TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE INGENIERA AGRÍCOLA

ELIZABETH MARLENI KOMIYA YOKOTA

LIMA – PERÚ

2024

“COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE DISIPADORES DE ENERGÍA ADAPTADOS A VERTEDEROS TIPO CREAGER CON PENDIENTES VARIABLES EN CONDICIONES DE LABORATORIO”

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	documents.tips Fuente de Internet	1%
2	qdoc.tips Fuente de Internet	<1%
3	vbook.pub Fuente de Internet	<1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
5	cybertesis.uni.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	www.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	www.repositorio.usac.edu.gt Fuente de Internet	<1%

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE DISIPADORES DE
ENERGÍA ADAPTADOS A VERTEDEROS TIPO CREAGER CON PENDIENTES
VARIABLES EN CONDICIONES DE LABORATORIO”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERA AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. ELIZABEHT MARLENI KOMIYA YOKOTA

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. JESÚS ABEL MEJÍA MARCACUZCO
Presidente

Dr. GONZALO RAMCÉS FANO MIRANDA
Asesor

Mg. Sc. TERESA OLINDA VELÁSQUEZ BEJARANO
Miembro

Ph. D. MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ DELGADO
Miembro

LIMA – PERÚ

2024

DEDICATORIA

*Dedico esta tesis a mi amado esposo,
mi compañero, mi bendición.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Dios, el Hacedor de maravillas, quien guía mi camino y me lleva a grandes propósitos.

Agradezco a mi familia por acompañarme con amor para lograr mis metas.

Agradezco a mi asesor Dr. Miguel Sánchez por sus conocimientos compartidos, por apoyarme en el desarrollo de la tesis y alentarme en alcanzar mis retos.

Asimismo, agradecer a mi profesor Dr. Gonzalo Fano por sus consejos que me han servido mucho en este trabajo de investigación.

Quiero expresar mi gratitud a mi institución, la Universidad Nacional Agraria La Molina por proporcionarme los recursos necesarios para la investigación, lo cual valoro en gran manera.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivo General.....	2
1.2	Objetivos específicos.....	3
III.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1	El principio de momentum.....	4
2.2	Análisis teórico de la disipación de energía.....	6
2.3	Perfil Creager.....	6
2.3.1	Cresta.....	7
2.3.2	Rápida.....	8
2.3.3	Disipador de energía.....	8
2.3.4	Colchón disipador de energía.....	8
2.4	Resalto hidráulico.....	9
2.4.1	La ecuación del resalto hidráulico.....	9
2.4.2	Tipos de resalto hidráulico.....	10
2.4.3	Características básicas del resalto hidráulico.....	13
2.4.4	Fuerzas de fricción.....	18
IV.	METODOLOGÍA.....	21
3.1	Materiales: Ubicación del experimento.....	21
3.2	Análisis exploratorio.....	21
3.3	Disipadores de energía.....	22
3.3.1	Características Hidráulicas del Disipador de Energía A.....	23
3.3.2	Características Hidráulicas del Disipador de Energía B.....	23
3.3.3	Características Hidráulicas del Disipador de Energía C.....	24
3.3.4	Características hidráulicas del Disipador de Energía D.....	24
3.4	Especificaciones técnicas del canal de pendiente variable.....	26

3.5	Metodología: Procedimiento de las pruebas experimentales	29
3.6	Registro de datos	31
3.7	Procesamiento de datos	32
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1	Análisis Exploratorio de Caudales para la Formación del Salto Hidráulico	33
4.2	El número de Froude	34
4.3	Función <i>Momentum</i> (M).....	35
4.4	Ecuación del Resalto Hidráulico en Canal Rectangular Horizontal.....	37
4.5	Característica del salto hidráulico en el canal de lecho Horizontal.....	38
4.5.1	Curvas Características del Resalto Hidráulico	38
4.5.2	Posición del Resalto Hidráulico	41
4.5.3	Tirantes Conjugados.....	44
4.5.4	Longitud del Resalto Hidráulico.....	47
4.5.5	Altura del Resalto Hidráulico	53
4.5.6	Pérdida de energía	56
4.5.8	Eficiencia del resalto hidráulico	63
4.5.7	Disipación de Energía.....	65
4.6	Resultados Experimentales en Canal con Pendiente Variable	66
4.6.1	Tirantes Conjugados considerando la pendiente	66
4.6.2	Longitud del Resalto Hidráulico.....	71
4.6.3	Altura del Resalto Hidráulico	75
4.6.4	Pérdida de Energía.....	79
4.6.5	Disipación de Energía.....	83
4.6.6	Eficiencia del resalto hidráulico	87
VI.	CONCLUSIONES.....	89
VII.	RECOMENDACIONES	90
VIII.	BIBLIOGRAFÍA	91

IX ANEXOS.....	94
Anexo I: Análisis de dispersión.....	94
Anexo II: Formación del Salto Hidráulico en el Disipador A.....	101
Anexo III: Formación del Salto Hidráulico en el Disipador B.....	104
Anexo IV: Formación del Salto Hidráulico en el Disipador C.....	106
Anexo V: Formación del Salto Hidráulico en el Disipador D.....	109
Anexo VI: Transformación del disipador D.....	111
Anexo VII: Características básicas del Salto hidráulico	113
En Lecho Horizontal ($S = 0$) y Caudal 11 l/s	113
En Lecho Horizontal ($S = 0$) y Caudal 13 l/s	117
En Lecho inclinado ($S = 0.01$) y Caudal 11 l/s.....	121
En lecho inclinado ($S = 0.01$) y Caudal 13 l/s.....	125
En Lecho inclinado ($S = 0.02$) y Caudal 11 l/s.....	129
En Lecho inclinado ($S = 0.02$) y Caudal 13 l/s.....	132
Anexo VIII: Eficiencia del Salto Hidráulico con pendiente variable (0, 1%, 2%).....	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ecuaciones empíricas de la Longitud del resalto hidráulico	14
Tabla 2: Función <i>momentum</i> ($S=0$) en los disipadores de energía	35
Tabla 3: Características básicas del resalto hidráulico	39
Tabla 4: Error porcentual y_2 : medido vs calculado	42
Tabla 5: Comparación y_2 (medido) vs y_{2c} (calculado)	43
Tabla 6: Tirantes Conjugados (Disipadores A, B)	44
Tabla 7: Tirantes Conjugados (Disipadores C, D)	45
Tabla 8: Longitud del resalto hidráulico (Ls/y_1)	47
Tabla 9: Longitud del resalto hidráulico (Ls/y_2)	49
Tabla 10: Longitud del Resalto Hidráulico ($S=0$)	51
Tabla 11: Altura del Resalto Hidráulico (h_j)	53
Tabla 12: Altura del Resalto Hidráulico.....	54
Tabla 13: Factor de fricción (F_f).....	56
Tabla 14: Pérdida relativa de energía	59
Tabla 15: Comparativo de la pérdida de energía (ΔE)	61
Tabla 16: Eficiencia del resalto con fricción	63
Tabla 17: Modelos de perfiles de flujo.....	66
Tabla 18: Disipador A: Tirantes Conjugados en pendiente.....	67
Tabla 19: Disipador B: Tirantes Conjugados en pendiente	68
Tabla 20: Disipador C: Tirantes Conjugados en Pendiente.....	69
Tabla 21: Disipador D: Tirantes Conjugados en Pendiente	70
Tabla 22: Longitud del resalto (Liso) en pendiente 1%, 2%	71
Tabla 23: Longitud del resalto (con fricción) en pendiente 1%, 2%	73
Tabla 24: Altura del resalto hidráulico (A y B).....	76
Tabla 25: Altura del resalto hidráulico (C y D).....	77
Tabla 26: Pérdida de energía con pendiente variable (A y B).....	80
Tabla 27: Pérdida de energía con pendiente variable (C y D).....	81
Tabla 28: Disipación de energía en pendiente (A y B).....	83
Tabla 29: Disipación de energía en pendiente (C y D).....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Perfil Creager. (Fuente: Ortiz, F. (2010). Modelo hidráulico físico de disipadores de energía, como ayuda de aprendizaje de la materia hidráulica. Tesis de grado.	7
Figura 2: Salto Hidráulico y parámetros asociados. Fuente: IIT Kharagpur (2008) Water Resources Engineering. Module 4. Lesson 8. Spillways and energy dissipators.	9
Figura 3: Resalto ondular ($1 \leq Fr_1 < 1,7$)	11
Figura 4: Resalto débil ($1,7 \leq Fr_1 < 2,5$)	11
Figura 5: Resalto oscilante ($2,5 \leq Fr_1 < 4,5$)	12
Figura 6: Resalto estable ($4,5 \leq Fr_1 < 9,0$)	12
Figura 7: Resalto fuerte ($Fr_1 \geq 9$)	12
Figura 8: Volumen de Control en el Resalto Hidráulico	13
Figura 9: Longitud de resalto hidráulico (L_s/y_2), con base en los datos y recomendaciones del U.S. Bureau of Reclamation. (Ven te Chow, 1994)	15
Figura 10: Posición del resalto hidráulico. Fuente: Rodríguez, P. (2008). Hidráulica II. ...	16
Figura 11: Caso 1 (claro)	17
Figura 12: Caso 2 (corrido)	17
Figura 13: Caso 3 (ahogado).	18
Figura 14: Bloques de impacto	19
Figura 15: Gravas	19
Figura 16: Croquis de ubicación del Laboratorio de Recursos Hídricos. Fuente: Sygic maps, datos cartográficos.	21
Figura 17: Aliviadero tipo Creager con accesorios disipadores de energía Fuente: Discovers with Armfield. (s.f.) S Series: Applied hydraulics & hydrology.....	22
Figura 18: Disipador Spillway Toe: A	23
Figura 19: Disipador Ski Jump: B	23
Figura 20: Disipador Energy Dispenser with Pegs:C	24
Figura 21: Disipador Gravel Box Stop Logs: D (original)	25
Figura 22: Disipador D (adaptado)	25
Figura 23: Canal inclinado de vidrio lateral autónomo.	26
Figura 24: Sección del canal rectangular	27
Figura 25: Bomba centrífuga	27
Figura 26: Consola de control.	28
Figura 27: Medidor de flujo (l/s)	28

Figura 28: Regla horizontal (mm)	29
Figura 29: Limnómetro digital (mm)	29
Figura 30: Sellado de los bordes con plastilina	30
Figura 31: Posición horizontal ($S = 0$).....	30
Figura 32: Encendido de la bomba	31
Figura 33: Marcador 100, pendiente 1%	32
Figura 34: Marcador 50, pendiente 2%	32
Figura 35: Vista del Disipador C, Salto Hidráulico $Q = 8.5$ l/s.....	33
Figura 36: Vista de Disipador A, Salto Hidráulico $Q = 7$ l/s.....	34
Figura 37: Figura representativa para el Número de Froude en el Salto Hidráulico.....	35
Figura 38: Ecuación del Resalto Hidráulico propuesta por Peterka (1984)	37
Figura 39: Curvas características del resalto hidráulico	41
Figura 40: Error porcentual y_2 : (medido) vs (calculado).....	42
Figura 41: Comparación entre los resultados medido y calculado.....	44
Figura 42: Tirantes conjugados en Superficies Lisas y con fricción	46
Figura 43: Longitud del Resalto Hidráulico (L_s/y_1) en superficies lisas y con fricción.	48
Figura 44: Longitud de resalto hidráulico (L_s/y_2), con base en los datos y recomendaciones del U.S. Bureau of Reclamation. (Ven te Chow, 1994)	51
Figura 45: Longitud de Resalto Hidráulico ($Q = 11$ l/s).....	52
Figura 46: Longitud del Resalto Hidráulico ($Q = 13$ l/s)	52
Figura 47: Altura del Resalto Hidráulico (h_j)	53
Figura 48: Altura del Resalto Hidráulico (Liso y con fricción)	56
Figura 49: Factor de fricción en disipadores de superficie lisa	58
Figura 50: Factor de fricción en disipadores con fricción	58
Figura 51: Pérdida de energía con fricción.....	61
Figura 52: Disipación de energía en disipadores con superficie lisa y con fricción	65
Figura 53: Eficiencia del resalto hidráulico con fricción	64
Figura 54. Disipador A: Tirantes Conjugados con Pendiente	67
Figura 55: Disipador B: Tirantes Conjugados con pendiente.....	69
Figura 56: Disipador C: Tirantes Conjugados con Pendiente	70
Figura 57: Disipador D: Tirantes Conjugados con Pendiente	71
Figura 58: Longitud del resalto hidráulico con pendiente variable (A y B).....	73
Figura 59: Longitud del resalto hidráulico con pendiente variable (C y D).....	75
Figura 60: Altura del Salto Hidráulico con pendiente	75

Figura 61: Altura del resalto hidráulico (A y B)	77
Figura 62: Altura del resalto hidráulico (C y D)	79
Figura 63: Pérdida de energía en superficie lisa con pendiente variable.....	81
Figura 64: Pérdida de energía en superficie con fricción con pendiente variable.....	83
Figura 65: Disipación de energía en disipadores lisos en pendiente variable	85
Figura 66: Disipación de energía en disipadores con obstáculo en pendiente variable	87
Figura 67: Eficiencia del resalto hidráulico con obstáculo en pendiente variable	88

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I: Análisis de dispersión.....	94
Anexo II: Formación del Salto Hidráulico en el Disipador A.....	101
Anexo III: Formación del Salto Hidráulico en el Disipador B.....	104
Anexo IV: Formación del Salto Hidráulico en el Disipador C.....	106
Anexo V: Formación del Salto Hidráulico en el Disipador D.....	109
Anexo VI: Transformación del disipador D	111
Anexo VII: Características básicas del Salto hidráulico	113
ANEXO VIII: Eficiencia del Salto Hidráulico con pendiente variable (0, 1%, 2%)	136

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación fue analizar y comparar el rendimiento hidráulico de cuatro tipos de disipadores de energía que se conectan a un vertedero de demasías aguas abajo, conocidos como Spillway toe (A), Ski Jump (B), Energy dispenser with pegs (C) y Gravel box stop Logs (D). Los experimentos se realizaron en un canal de sección rectangular con un lecho inclinado y horizontal con pendientes de 1% y 2%, y dos flujos de agua de 11 l/s y 13 l/s. Para el estudio, se dividieron los disipadores en dos categorías: los disipadores de superficies lisas (A y B) y los disipadores de superficies con fricción (C y D). Los hallazgos del estudio revelaron una fuerte correlación entre las curvas características del salto hidráulico y los datos obtenidos en los experimentos en el canal horizontal. Se logró la mayor disipación de energía, 69.7% en condiciones de fricción (disipador D) y una pendiente del 1%. La mayor eficiencia del salto se obtuvo con 0.726, también en condiciones de fricción (disipador C) y una pendiente del 1%.

Palabras claves: resalto hidráulico, fuerzas de fricción, disipadores de energía, eficiencia del resalto, disipación de energía.

ABSTRACT

The main objective of this research was to analyze and compare the hydraulic performance of four types of energy dissipators connected to a downstream overflow spillway, namely Spillway toe (A), Ski Jump (B), Energy dispenser with pegs (C), and Gravel box stop logs (D). The experiments were conducted in a rectangular section channel with inclined and horizontal bed with slopes of 1% and 2% and two water flows of 11 l/s and 13 l/s. For the study, the dissipators were divided into two categories: smooth surface dissipators (A and B) and dissipators with friction surfaces (C and D). The findings of the study revealed a strong correlation between the characteristic curves of the hydraulic jump and the data obtained in the experiments in the horizontal channel. The highest energy dissipation was achieved, 69.7% under friction conditions (dissipator D) and a 1% slope. The highest jump efficiency was obtained with 0.726, also under friction conditions (dissipator C) and a 1% slope.

Keywords: hydraulic jump, friction forces, energy dissipators, jump efficiency, energy dissipation.

I. INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad el hombre ha procurado acopiar el agua de los ríos, el caso documentado más antiguo es la presa Jawa, en Jordania, construida alrededor de 3000 a.C., su principal objetivo era almacenar agua para usarla en tiempo de déficit, hoy en día, las presas son grandes obras hidráulicas de regulación, cuya función principal es almacenar el agua proveniente de los ríos y las lluvias, controlar las inundaciones, y asegurar la disponibilidad temporal y espacial del agua. El agua dulce es un recurso finito, escaso y vulnerable, indispensable para la vida, es sabido que el agua se renueva mediante el ciclo hidrológico, sin embargo, el problema está en la disponibilidad de este recurso, que se mide desde tres aspectos inseparables: la cantidad, la calidad y la oportunidad. Desde el punto de vista de la oferta del agua, la oportunidad es un aspecto fundamental cuando se trata de asegurar el agua en el tiempo, es así como la presa viene a cumplir una función importante en el control del agua.

Los excedentes de las presas son evacuados por medio de un mecanismo único de disipación de energía, el cual es el resalto hidráulico, aguas abajo los disipadores de energía se convierten en un elemento indispensable porque no sólo incrementan su efectividad disipando la energía residual, sino que además asegura la estabilidad del flujo, protegiendo las estructuras aguas debajo de la erosión, socavación o acumulación de sedimentos y acorta la longitud del colchón disipador, reduciendo de esta manera los costes revestimiento. Existen distintos tipos de disipadores de energía, el diseño depende de las condiciones geológicas e hidrológicas del lugar. Muchos investigadores han buscado a través de ensayos en laboratorio el diseño experimental; por la observación, medición, comparación y comprensión del comportamiento hidráulico de los disipadores de energía han logrado grandes avances, aunque todavía faltan prototipos en condiciones de fricción y en pendiente.

Los daños en las estructuras aguas abajo se debe muchas veces al uso inadecuado de los disipadores de energía. Según Zare y Shirvani (2016) el modelo experimental es importante para diseñar el mejor estado de disipación de energía en aliviaderos con pendientes.

Por otra parte, el parámetro más importante de la investigación es el número de Froude del flujo entrante, Peterka (1984) propone la aplicabilidad de este valor adimensional en la ecuación que caracteriza al resalto hidráulico, asegura que la ley de similitud establece que donde predominan las fuerzas gravitacionales, como lo hacen en los fenómenos de canal abierto, el número de Froude debe tener el mismo valor en modelo y prototipo. Por lo tanto, un resalto modelo en un canal de prueba tendrá las características idénticas de un resalto prototipo en una cuenca de quietud, si los números de Froude de los flujos entrantes son los mismos. Aunque las conversiones de energía en un resalto hidráulico tienen alguna relación con el número de Reynolds, predominan las fuerzas de gravedad, y el número de Froude se vuelve más útil para trazar las características de la cuenca de inmovilización.

En la revisión de literatura se considera tres pilares fundamentales para el análisis en canal horizontal: a) El principio de momentum, b) La ecuación del resalto hidráulico y c) Las fuerzas de fricción.

Kumar y Mehta (2010) señalan que hay muy poca información disponible sobre los canales inclinados, además se ha estudiado las características del salto hidráulico en términos del número de Froude solamente. Ellos presentan el estudio del resalto hidráulico en canal prismático en pendiente y los resultados obtenidos se compararon con el resultado del canal horizontal para determinar el efecto de la pendiente en las características del salto hidráulico. En base a esta información se ha efectuado el análisis del efecto de las pendientes.

En el presente trabajo de investigación, el análisis se inicia con la exploración de caudales en el volumen de control para identificar los elementos del resalto hidráulico, verificar el efecto de las fuerzas de fricción con la base teórica, el efecto de las pendientes y la disipación de energía. Finalmente, se evalúa la eficiencia del dissipador tomando en cuenta las pérdidas por fricción y las pendientes propuestas.

1.1 Objetivo General

Comparar el comportamiento hidráulico de dissipadores de energía adaptados a vertederos tipo Creager, para la determinación del mejor estado de disipación de energía por el efecto de la pendiente, en condiciones de laboratorio.

1.2 Objetivos específicos

1. Analizar en un canal de lecho horizontal, las características del flujo generado por los cuatro disipadores de energía al pie del vertedero cimacio tipo Creager, para evaluar el colchón hidráulico.
2. Evaluar por el efecto de las pendientes y por el tipo de disipador de energía, los niveles del tirante aguas abajo, para formar el resalto hidráulico.
3. Evaluar el resalto hidráulico con cada disipador de energía y con su respectiva pendiente del canal, 0%, 1% y 2%, determinando las características del flujo y la disipación de energía.
4. Determinar el disipador de energía más eficiente para las pendientes de 0%, 1% y 2%.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El principio de momentum

La función *Momentum* o Fuerza Específica se basa en el principio de la conservación del *Momentum* de la segunda Ley de Newton que dice que el cambio de la cantidad de movimiento sobre unidad de tiempo es equivalente a la resultante de las fuerzas externas en un volumen de control.

Entonces, la fuerza específica (M) se define como:

$$M = \bar{y}_i A_i + \frac{Q^2}{A_i g} \quad (1)$$

Donde el primer término representa el empuje hidrostático por unidad de peso y también el momento estático del área respecto de la superficie libre. El segundo término representa la cantidad de movimiento del flujo que atraviesa la sección del canal en la unidad de tiempo y por unidad de peso del agua.

En un volumen de control las fuerzas específicas son iguales en ambas secciones:

$$\bar{y}_1 A_1 + \frac{Q^2}{A_1 g} = \bar{y}_2 A_2 + \frac{Q^2}{A_2 g} \quad (2)$$

Las profundidades y_1 e y_2 , se llaman profundidades conjugadas y tienen la particularidad que la función *Momentum* (M) es la misma para ambas profundidades, mientras que existe una variación de la energía específica, debida a la pérdida de energía producida por el resalto.

Utilizando el hecho de que, para canal rectangular, $\bar{y} = \frac{y}{2}$, $A = yb$, $q = \frac{Q}{b}$, la fuerza específica para canal rectangular puede ser escrita como:

$$\frac{y_1^2 b}{2} + \frac{(qb)^2}{g(by_1)} = \frac{y_2^2 b}{2} + \frac{(qb)^2}{g(by_2)}$$

$$\frac{y_1^2 b}{2} + \frac{q^2 b}{gy_1} = \frac{y_2^2 b}{2} + \frac{q^2 b}{gy_2}$$

Reemplazando el caudal unitario en términos de velocidad (v) y altura del resalto (y) se tiene que el caudal unitario (q) es: $q = vy$

$$\frac{y_1^2 b}{2} + \frac{v_1^2 y_1^2 b}{gy_1} = \frac{y_2^2 b}{2} + \frac{v_2^2 y_2^2 b}{gy_2}$$

$$\frac{y_1^2}{2} + \frac{v_1^2 y_1^2}{gy_1} = \frac{y_2^2}{2} + \frac{v_2^2 y_2^2}{gy_2}$$

El Número de Froude se define: $Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}}$

$$\frac{y_1^2}{2} + Fr_1^2 y_1^2 = \frac{y_2^2}{2} + v_2^2 y_2^2 y_2^2$$

Despejando los tirantes conjugados

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (3)$$

El resalto hidráulico produce una gran cantidad de pérdida de energía interna y no se puede evaluar con la ecuación de la energía.

López (1997) explica, “para encontrar una ecuación que relacione los elementos del resalto, no sirve el teorema de Bernoulli, porque no conocemos la pérdida de carga H_B en el resalto”. El autor sostiene que el cálculo del resalto se basa en el teorema de la cantidad de movimiento. Para la aplicación de la ecuación de cantidad de movimiento, se considera que el canal es horizontal y de sección constante.

De la misma manera, Ven te Chow (1994) afirma que si se aplica la ecuación de la energía específica al problema del resalto hidráulico:

“Las pérdidas de energía internas desconocidas representadas por h_f son indeterminadas, y la omisión de este término podría dar como resultado errores considerables. Si en su lugar se aplica la ecuación de *momentum* puesto que ésta evalúa sólo las fuerzas externas, las fuerzas internas no entrarían en consideración. Las pérdidas por fricción se omiten tomando en cuenta que el resalto hidráulico ocurre en un tramo corto del canal, los efectos de las fuerzas externas resultan insignificantes en comparación con las pérdidas internas” (p. 51).

2.2 Análisis teórico de la disipación de energía

Es común encontrar en los libros de hidráulica de canales abiertos la teoría del resalto hidráulico basada en el principio de la conservación del *momentum* del cual se deriva las ecuaciones del resalto hidráulico y por lo general, se omiten las pérdidas de energía por el efecto de fricción de las paredes y el fondo del canal, debido a que se produce en un tramo corto y turbulento. Según Duarte (2011) se cumple las siguientes hipótesis:

- Canal de pendiente longitudinal horizontal.
- El efecto de la fricción es despreciable.
- No existe estructura en el tramo 1-2 del volumen de control.
- El coeficiente de Boussinesq es igual a la unidad.

Esto indica que la fuerza específica se mantiene constante. ($F_{s1} = F_{s2}$); sin embargo, cuando no se cumple alguna de las hipótesis anunciadas, los resultados experimentales diferirán del criterio teórico ($F_{s1} \neq F_{s2}$).

Montoya *et.al.* (1999) atribuye que en sus ensayos comparó los resultados teóricos con los valores medidos y halló que “la teoría sobre estima el valor de la altura secuente y subestima la energía disipada en un resalto hidráulico debido a las pérdidas por fricción”.

Duarte (2011) afirma que mediante pruebas en laboratorio se ha podido establecer que el tirante conjugado mayor con fricción (y_{2f}) es aproximadamente igual a 0.85-0.9 el tirante conjugado mayor sin fricción (y_2). Asimismo, en cuanto a la disipación de energía señala que “los resultados experimentales han mostrado que la disipación de energía que ocurre en un resalto libre con fricción es aproximadamente de (1.2-1.3) veces la disipación de energía en un resalto libre sin fricción”.

Naudascher (2000) determina que el uso de los bloques de impacto es una medida frecuentemente utilizada para la estabilización del resalto hidráulico, colocados dentro del colchón de aguas en una o más filas; el efecto provoca una reducción de la profundidad y_2 aguas abajo y una menor longitud del resalto. Por tanto, Naudascher concluye que “en la ecuación de impulso se deben añadir a las fuerzas exteriores actuantes sobre el volumen de control, la suma de F_B de todas las fuerzas que son transmitidas por los bloques de impacto”.

2.3 Perfil Creager

El aliviadero de demasías de perfil Creager, es una estructura de control de tipo cimacio, tiene un perfil en forma de S, la forma redondeada de la cresta reduce los efectos negativos

y permite una máxima descarga, la superficie de agua sigue la trayectoria de la lámina hasta su descenso aguas abajo, probablemente sea el más usado para descargar el flujo excedente con seguridad fuera de la presa. Está formado por una cresta, una rápida y generalmente lleva un dissipador de energía que constituye parte del vertedero de demasías.

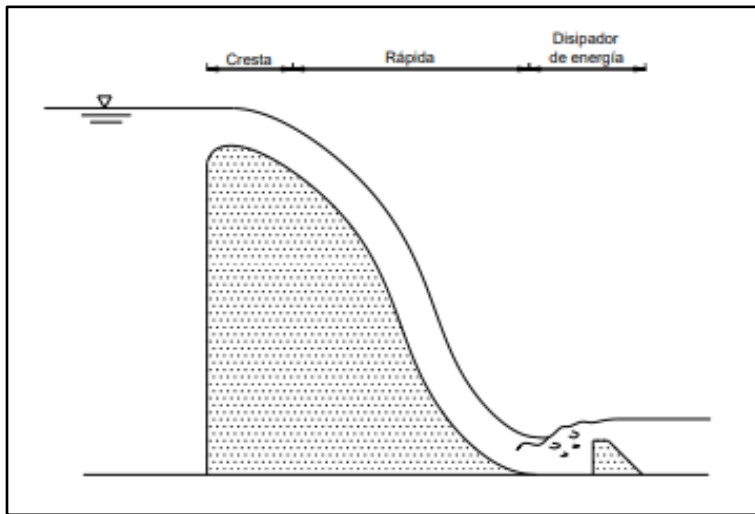


Figura 1: Perfil Creager. (Fuente: Ortiz, F. (2010). Modelo hidráulico físico de dissipadores de energía, como ayuda de aprendizaje de la materia hidráulica. Tesis de grado.

Según IIT Kharagpur (2008) el excedente que se descarga a través del aliviadero tiene que fluir desde una elevación más alta en el nivel de la superficie del reservorio hasta una más baja en el nivel natural del río, en la escorrentía descendente a través de una salida, que también se considera parte del aliviadero. En la parte inferior del canal, donde el agua se precipita para encontrarse con el río natural, suele contar con un dispositivo de disipación de energía que elimina la mayor parte de la energía del agua que fluye. Estos dispositivos, comúnmente llamados como dissipadores de energía, están obligados a evitar que la superficie del río sea dañada peligrosamente por el impacto del agua saliente.

2.3.1 Cresta

La cresta es la parte importante del diseño, la forma de la cresta del perfil Creager tiene una descarga muy eficiente, su perfil se ajusta estrechamente a la parte inferior de una lámina de agua que cae de un vertedero de pared delgada, el flujo sobre la cresta se adhiere a la cara del perfil impidiendo el acceso de aire a la parte inferior de la lámina de agua que fluye (IIT Kharagpur 2008). La cresta de este perfil se usa también para el diseño de otros tipos de aliviaderos.

2.3.2 Rápida

La rápida es la sección que continua a la cresta en una tangente a lo largo de una pendiente y luego adopta una forma curva inversa en el pie del vertedero, para inducir al flujo a una base deslizante. El flujo de esta sección tiene un régimen supercrítico, desciende por gravedad a altas velocidades. El perfil de la rápida puede presentarse lisa, escalonada o con bloques.

2.3.3 Disipador de energía

El disipador de energía es un elemento terminal que cumple la función de aumentar la efectividad de la disipación de la energía generada por la turbulencia en el resalto hidráulico y dar estabilidad al flujo se construyen con frecuencia en el colchón disipador; un diseño eficiente permite que estas estructuras tengan las características hidráulicas idóneas para controlar el flujo supercrítico y evitar el deterioro de las estructuras. El comportamiento hidráulico de estos dispositivos depende de su diseño y se sujeta a las condiciones geológicas e hidrológicas del lugar.

2.3.4 Colchón disipador de energía

Según Sánchez (2012) el colchón disipador de energía reduce significativamente la energía cinética del flujo supercrítico al pie de presa antes de que el agua retorne al cauce del río. La longitud del colchón debe ser aproximadamente la longitud del resalto. Ésta se puede disminuir construyendo bloques de hormigón, dientes o sobre elevando la salida.

Según Villamarín (2013) el resalto hidráulico es utilizado para disipar la energía en el colchón disipador, sin embargo, en la práctica, rara vez se usa para confinar toda la longitud del resalto hidráulico libre sobre una zona revestida, porque sería muy costoso. Por ese motivo es frecuente que se instalen accesorios en el colchón disipador de energía para reducir la longitud del resalto hidráulico y el costo de revestimiento.

Para Duarte (2011) es común recurrir a la formación de un resalto hidráulico estable para proteger la estructura de la erosión. El diseño del colchón disipador de energía debe considerar lo siguiente:

- Que genere un salto hidráulico estable
- Que permita una buena disipación de energía
- Que la longitud de la estructura sea lo más corta posible
- Que no se produzca cavitación en los accesorios que la componen

- Que el flujo subcrítico, inmediatamente después de la estructura de disipación, debe ser compatible con el régimen del cauce.

2.4 Resalto hidráulico

El resalto hidráulico es el ascenso brusco de la superficie del agua debido a la transición del régimen supercrítico a subcrítico, causando una gran turbulencia y a la vez pérdidas de energía interna considerables difíciles de estimar por lo que la aplicación de la ecuación de *momentum* es de mayor utilidad que la ecuación de la energía.

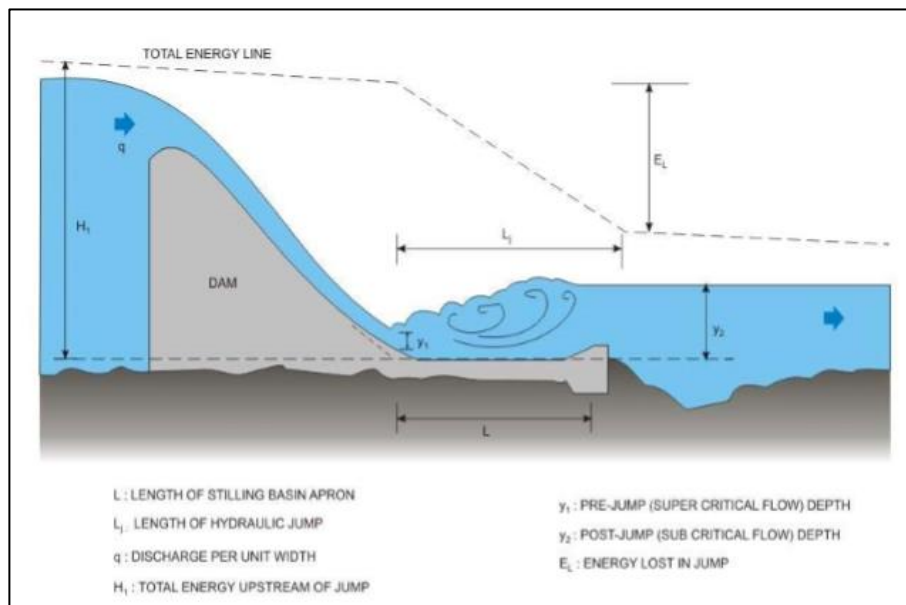


Figura 2: Salto Hidráulico y parámetros asociados. Fuente: IIT Kharagpur (2008) *Water Resources Engineering. Module 4. Lesson 8. Spillways and energy dissipators.*

El flujo supercrítico ingresa con un tirante pequeño y con alta velocidad, se transforma en un tirante mayor y con baja velocidad en un corto tramo.

2.4.1 La ecuación del resalto hidráulico

Peterka (1984) propone la aplicabilidad del número de Froude en la ecuación que caracteriza al resalto hidráulico, asegura que la ley de similitud establece que donde predominan las fuerzas gravitacionales, como lo hacen en los fenómenos de canal abierto, el número de Froude debe tener el mismo valor en modelo y prototipo. Por lo tanto, un salto modelo en un canal de prueba tendrá las características idénticas de un salto prototipo en una cuenca de quietud, si los números de Froude de los flujos entrantes son los mismos. Para Chanson (2002) el parámetro más importante del resalto hidráulico es el número de Froude del flujo entrante.

Aunque las conversiones de energía en un salto hidráulico tienen alguna relación con el número de Reynolds, predominan las fuerzas de gravedad, y el número de Froude se vuelve más útil para trazar las características de la cuenca de inmovilización (Peterka, 1984).

El número de Froude (Fr_1) es un número adimensional, que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido.

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} \quad (4)$$

Donde:

- Fr_1 = Número de Froude
- V_1 = Velocidad del agua en la sección del canal
- g = Constante de la gravedad
- y_1 = Profundidad del agua

Según Ven Te Chow (1994) “Un resalto hidráulico se formará en el canal si el número de Froude F_1 del flujo, la profundidad del flujo y_1 y la profundidad y_2 aguas abajo satisfacen la ecuación”.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$$

Donde:

- y_1, y_2 son los tirantes conjugados
- $y_2 > y_1$
- $Fr_1 > 1$; es el número de Froude del flujo entrante.

La ecuación muestra que la relación de profundidades y_2, y_1 están en función del número de Froude. Se puede calcular el tirante conjugado mayor (y_2) a partir del tirante de inicio y_1 del resalto hidráulico y el número de Froude.

Según Sotelo (2002) “los criterios teóricos de cálculo con base en la Ecuación de *Momentum* proporciona un método adecuado y seguro, en todo caso conservador, para obtener los tirantes conjugados, en un sentido o en otro, en términos del número de Froude o equivalente”.

2.4.2 Tipos de resalto hidráulico

Los resaltos se clasifican según el valor del número de Froude aguas arriba.

- $1 \leq Fr_1 < 1,7$ resalto ondular.
- $1,7 \leq Fr_1 < 2,5$ resalto débil.
- $2,5 \leq Fr_1 < 4,5$ resalto oscilante.
- $4,5 \leq Fr_1 < 9,0$ resalto estable.
- $Fr_1 \geq 9,0$ resalto fuerte.

a) Resalto ondular:

La superficie de agua presenta la tendencia a la formación de ondulaciones. La disipación de energía es baja, menor de 5%.

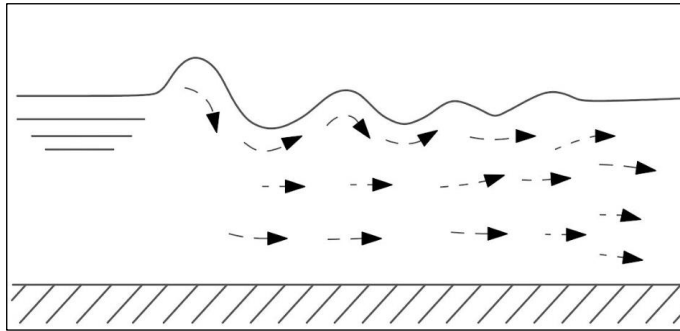


Figura 3: Resalto ondular ($1 \leq Fr_1 < 1,7$)

b) Resalto débil

El ondulamiento de la superficie en el tramo de mezcla es mayor y aguas abajo las perturbaciones superficiales son menores. Se generan muchos rodillos de agua en la superficie del resalto, seguidos de una superficie suave y estable. La energía disipada está entre el 5%-15%.

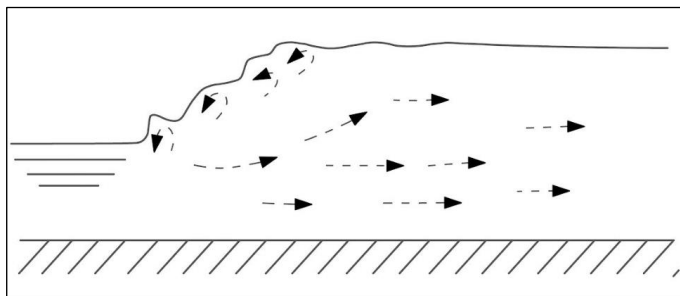


Figura 4: Resalto débil ($1,7 \leq Fr_1 < 2,5$)

c) Resalto oscilante

Presenta un chorro intermitente sin ninguna periodicidad, que parte desde el fondo y se manifiesta hasta la superficie, y retrocede nuevamente. Cada oscilación produce una gran onda que puede viajar largas distancias. La disipación de energía es del 15%-45%.

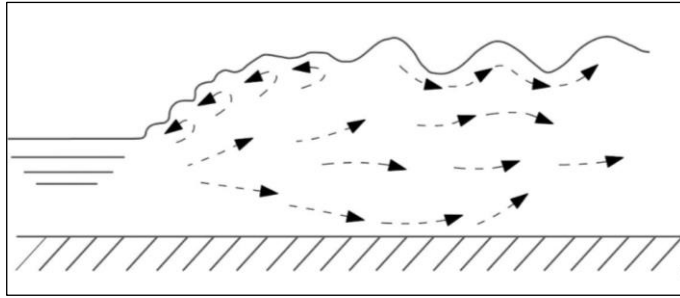


Figura 5: Resalto oscilante ($2,5 \leq Fr_1 < 4,5$)

d) Resalto estable

Se trata de un resalto plenamente formado, con mayor estabilidad y el rendimiento es mejor, pudiendo variar la energía disipada entre 45 % a 70 %.

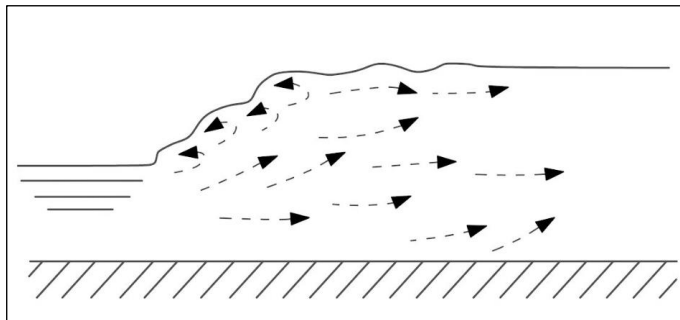


Figura 6: Resalto estable ($4,5 \leq Fr_1 < 9,0$)

e) Resalto fuerte

Resalto con gran disipación de energía, puede alcanzar hasta 85%, gran ondulación de la superficie con tendencia de traslado de la zona de régimen supercrítico hacia aguas abajo. Caracterizado por altas velocidades y turbulencia, con generación de ondas.

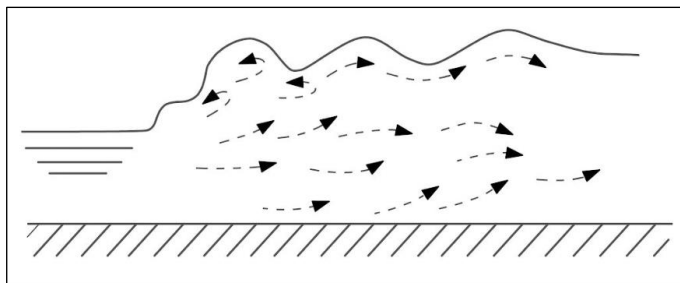


Figura 7: Resalto fuerte ($Fr_1 \geq 9$)

El salto ondular y el débil, como sus nombres lo indican, son saltos incipientes y con pocas dimensiones, debido a que tienen lugar en flujos con poca energía, de ahí que no requieren accesorios en la estructura, tales como: dientes, dados o deflectores para aumentar su poder disipador, la pérdida de energía es inferior al 15%. El salto oscilante debe su nombre a que

el chorro de llegada se dirige de manera intermitente hacia el fondo o hacia la superficie del agua, dando lugar a la generación de oleaje, que es capaz de viajar kilómetros hacia aguas abajo, lo cual ocasiona erosiones en las márgenes del cauce. Por esta razón, este tipo de salto se debe evitar; y de no ser posible, lo más importante es suprimir las olas. El salto estable tiene buen diseño con combinaciones de accesorios. Logra disipar la energía del flujo de llegada hasta un 70%. El salto fuerte es muy sensible a los tirantes, es decir, pequeñas variaciones de dicho tirante ocasionan desplazamientos del salto hacia aguas abajo. Además, para $Fr_1 > 10$ ya el salto no es la solución más económica como disipador de energía, por las grandes dimensiones que requiere el estanque o pozo.

2.4.3 Características básicas del resalto hidráulico

Las características del resalto hidráulico son analizadas para el diseño del colchón disipador.

Los diseños se basan en el principio del resalto hidráulico, el cual transforma las altas velocidades del flujo incidente a velocidades que no puedan dañar el régimen de aguas abajo.

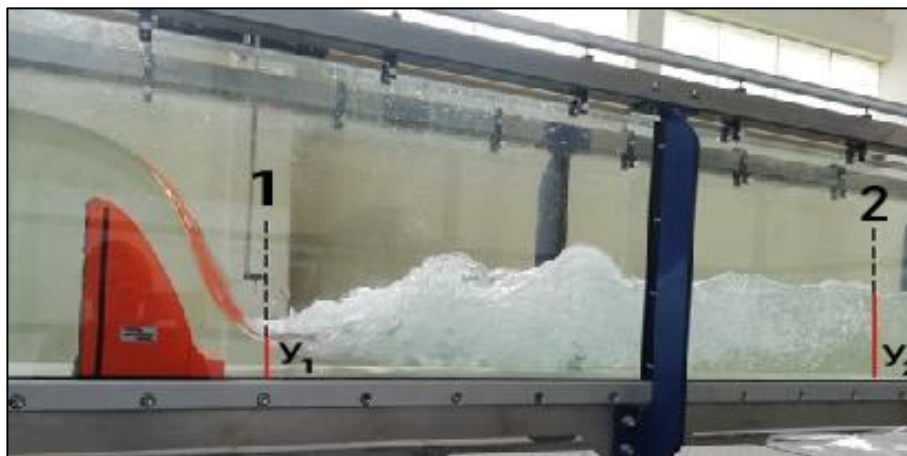


Figura 8: Volumen de Control en el Resalto Hidráulico

En la Figura 8 se observa un resalto hidráulico en un volumen de control de sección 1 y 2, delimitado por los tirantes conjugados (y_1 , y_2), son el inicio y el final del resalto hidráulico, en este caso se muestra el disipador A desarrollando su máxima capacidad de 29 l/s.

La cantidad de energía disipada en un resalto depende del número de Froude del flujo entrante.

Longitud del resalto hidráulico

La longitud del resalto hidráulico es la distancia medida desde la entrada del resalto hidráulico hasta donde alcanza la profundidad conjugada. Según Rodríguez (2017) la

longitud del resalto hidráulico se toma desde el inicio del régimen supercrítico hasta donde se estabiliza el flujo y alcanza el tirante máximo.

La longitud del resalto hidráulico es un parámetro importante en el diseño de obras hidráulicas, ya que definirá la necesidad de incorporar obras complementarias para reducir esta longitud y/o aplicar medidas de protección de la superficie para incrementar su resistencia a los esfuerzos cortantes.

Las ecuaciones empíricas de la longitud del resalto hidráulico principales son las siguientes:

Tabla 1: Ecuaciones empíricas de la Longitud del resalto hidráulico

Autor	Ecuación empírica	
Smetana	$6(y_2 - y_1)$	(5)
Safranets	$5.9(y_1 Fr_1)$	(6)
Einwacher	$8.3y_1(Fr_1 - 1)$	(7)
Chertousov	$10.3y_1(Fr_1 - 1)^{0.81}$	(8)
Wóycicki	$(y_2 - y_1)(8 - \frac{0.05y_2}{y_1})$	(9)
USBR	$6.9(y_2 - y_1)$	(10)
Silvester	$y_1(9.75(Fr_1 - 1)^{1.01})$	(11)
Peterka	$y_2(3.491 + 0.73Fr_1 - 0.06Fr_1^2 + 0.001441Fr_1^3)$	(12)

Fuente: (Rodríguez, 2008)

Las mediciones de la longitud del resalto hidráulico son directas y ha sido muy estudiada por diferentes investigadores de las que se han derivado varias ecuaciones para la longitud del resalto. Para López (1997) “Es difícil precisar dónde realmente termina a fines prácticos el resalto y por ello las leyes propuestas por diversos investigadores presentan ciertas discrepancias al definir su longitud”. Otros autores destacan también la dificultad para medir la longitud del resalto, “La longitud del salto es difícil de medir debido a la incertidumbre que implica determinación exacta de sus secciones, inicial y final. Por los que es indispensable recurrir a fórmulas empíricas de varios investigadores” (Rodríguez, 2008).

La longitud del resalto (L_s) representada en curvas según U.S. Bureau of Reclamation:

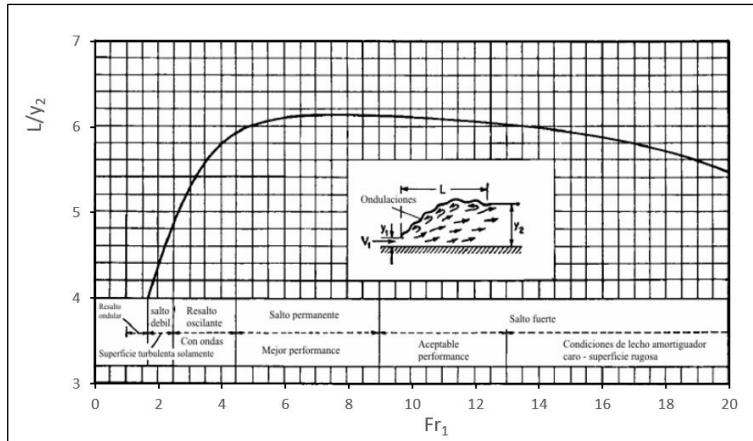


Figura 9: Longitud de resalto hidráulico (L/y_2), con base en los datos y recomendaciones del U.S. Bureau of Reclamation. (Ven te Chow, 1994)

En la Figura 9 se presenta la curva recomendada, que se considera aplicable para uso general.

Pérdida de energía

En el resalto hidráulico la pérdida de energía es igual a la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto.

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} \quad (13)$$

Donde:

- E_1 = Energía específica antes del resalto hidráulico
- E_2 = Energía específica después del resalto hidráulico
- y_1 = Tirante antes del resalto hidráulico
- y_2 = Tirante después del resalto hidráulico

Eficiencia

Es la relación entre la energía específica antes y después del resalto en una función adimensional y depende sólo del número de Froude del flujo de aproximación (Fr_1).

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8Fr_1^2 + 1)^{\frac{3}{2}} - 4Fr_1^2 + 1}{8Fr_1^2(2 + Fr_1^2)} \quad (14)$$

Altura del resalto hidráulico

La altura del resalto (h_j) es la diferencia entre los tirantes después y antes del resalto, y_2 , y_1 respectivamente.

$$h_j = y_2 - y_1$$

(15)

Posición del resalto hidráulico

Existen tres modelos alternativos para la posición del resalto hidráulico:

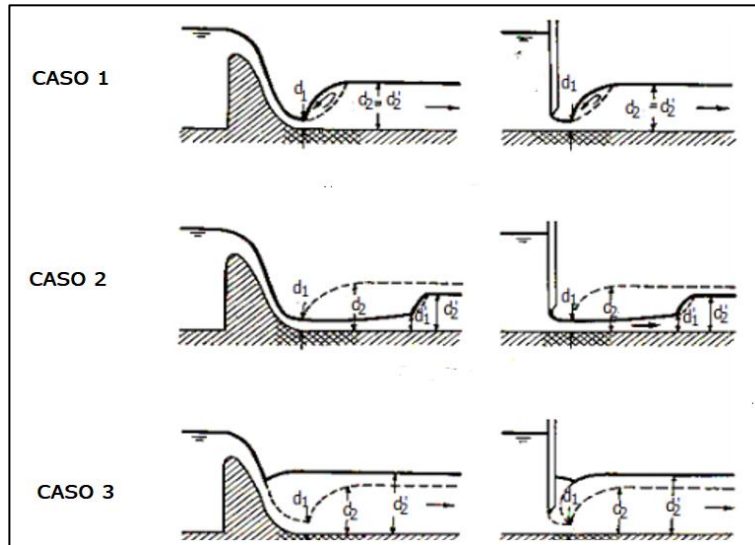


Figura 10: Posición del resalto hidráulico. Fuente: Rodríguez, P. (2008). Hidráulica II.

Caso 1 (salto claro): ($d_2' = d_2$)

Representa el modelo para el cual la profundidad de aguas abajo d_2' es igual a la profundidad d_2 secunete a d_1' . En este caso los valores de Fr_1 , d_1 y d_2' satisfarán la ecuación:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$$

y el salto ocurre sobre un piso sólido inmediatamente adelante de la profundidad d_1 . Para propósitos de protección contra la socavación, éste es un caso ideal. Una objeción importante a este modelo, sin embargo, es que una pequeña diferencia entre los valores reales y supuestos de los coeficientes hidráulicos relevantes puede causar que el salto se mueva hacia aguas abajo de su posición estimada. En consecuencia, siempre es necesario algún dispositivo para el control de su posición.

En la Figura 11 se observa el salto claro con el disipador B, el remolino se produce inmediatamente al pie del vertedero.



Figura 11: Caso 1 (claro)

Caso 2 (salto corrido): ($d_2' < d_2$)

Representa el patrón para el cual la profundidad de salida d_2' es menor que d_2 , esto significa que la profundidad de salida del caso 1 se disminuye. Como resultado, el resalto se desplazará hacia aguas abajo. En lo posible, este caso debe evitarse en el diseño, debido a que el resalto rechazado fuera de la zona resistente a la socavación ocurrirá en un lecho de cantos rodados sueltos o, peor aún, en un canal completamente desprotegido, dando como resultado una erosión severa. La solución para el diseño es utilizar cierto control en el fondo del canal, el cual incrementará la profundidad en la salida y asegurará un resalto dentro de la zona protegida.

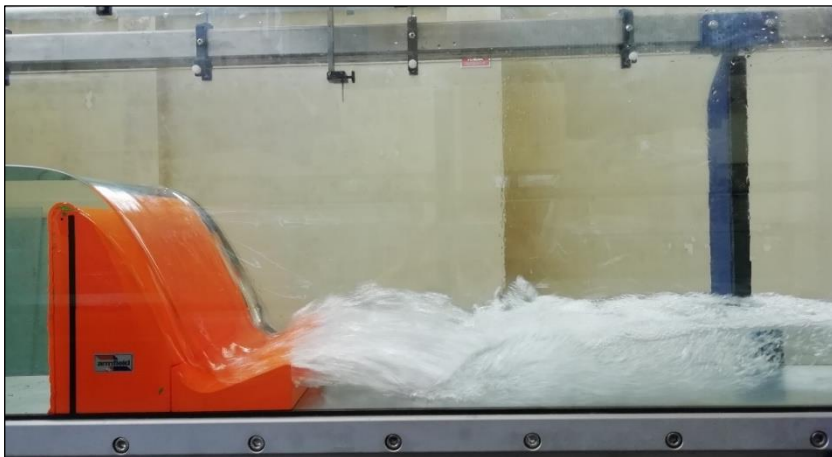


Figura 12: Caso 2 (corrido)

Esta posición de resalto debe evitarse, porque al estar fuera de la zona resistente a la socavación ocurrirá en un lecho de cantos rodados sueltos, o en un canal desprotegido dando como resultado una erosión severa (Ven Te Chow, 1994).

Caso 3 (salto ahogado): ($d_2' > d_2$)

Representa un modelo en el cual la profundidad de salida d_2' es mayor que d_2 . Esto significa que la profundidad de salida con respecto al caso 1 se incrementa. Como resultado, el resalto se verá forzado hacia aguas arriba, y finalmente puede ahogarse en la fuente y convertirse en un resalto sumergido. Este, tal vez es el caso más seguro para el diseño, debido a que la posición del resalto sumergido puede fijarse con rapidez.

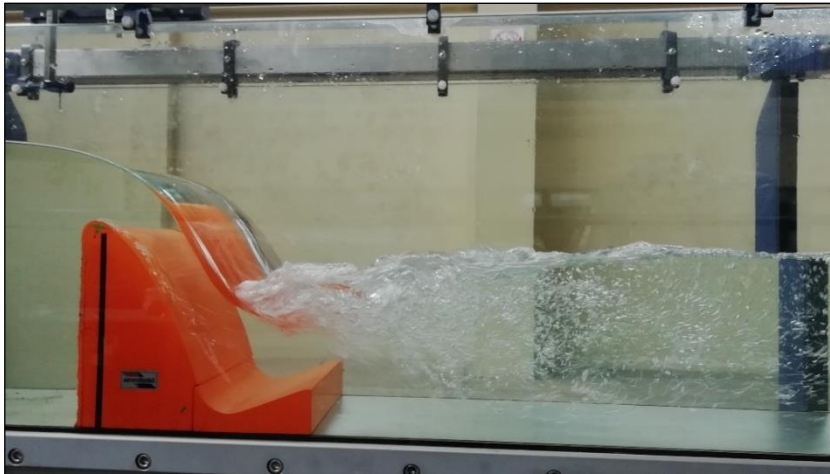


Figura 13: Caso 3 (ahogado).

Este modelo de resalto es tal vez el caso más seguro para el diseño, pero este modelo no es eficiente, debido a que se disipará muy poca energía.

2.4.4 Fuerzas de fricción

En un resalto hidráulico en canal horizontal sin fricción, las fuerzas específicas antes y después del resalto son iguales, pero cuando existe fricción, no permanecen constantes, sino que se produce una fuerza adicional (F_d) que ejerce la fuerza de fricción en dirección contraria al flujo.

$$F_d = F_{S_1} - F_{S_2} \quad (16)$$

La resultante es la fuerza de fricción (F_d) y $F_{S_1} \neq F_{S_2}$

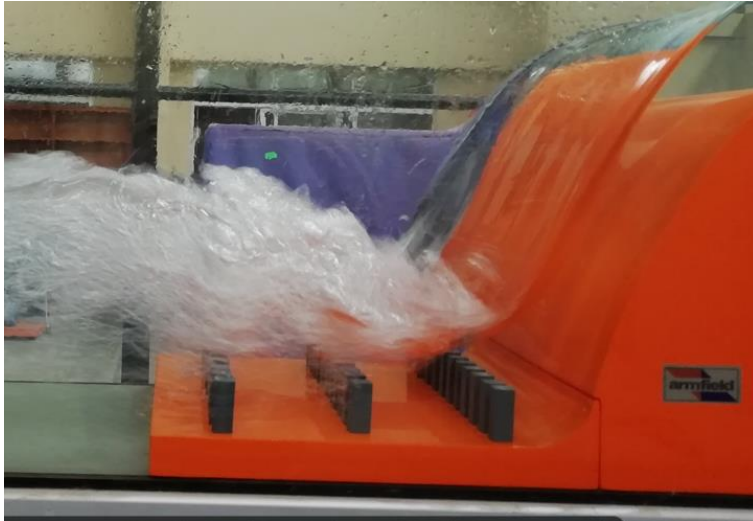


Figura 14: Bloques de impacto



Figura 15: Gravas

En las Figura 14 y Figura 15 se observan los disipadores C y D respectivamente, se caracterizan por presentar obstáculos en el colchón disipador, estos disipadores producen fuerzas adicionales a la resultante de las fuerzas externas de la ecuación de *momentum* y se constituyen disipadores con fricción.

Montoya *et.al.* (1999) señala que la teoría clásica del resalto hidráulico iguala el *momentum* entre dos secciones, sin embargo, cuando existen diferencias observadas entre las alturas teóricas y las experimentales y en consecuencia las discrepancias sobre la disipación de energía obtenida, se estaría hablando de una disipación en el *momentum* lineal, que es la disipación por fricción.

Según Montoya *et.al.* (1999) las expresiones para estimar la fuerza de fricción y la energía disipada entre las secciones las cuales son aplicadas a canal rectangular y baja pendiente son:

$$F_f = \frac{\rho g (y_2 - y_1)}{2y_2} (y_{2c} - y_2)(y_1 + y_2 + y_{2c}) \quad (17)$$

$$\Delta E_f = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} + \left(\frac{y_1 + y_2}{2y_1 y_2} \right) \frac{F_f}{\rho g} \quad (18)$$

F_f es el factor de fricción. En la ecuación (18) se observa que existe una componente que representa las pérdidas internas y otra componente adicional debida a la fuerza de fricción con las paredes y el fondo. Si no existieran fuerzas de fricción, la ecuación quedaría sólo con la componente de las pérdidas internas del resalto.

Duarte (1999) formula la ecuación de la pérdida de energía que resulta de similar a la ecuación (18):

$$\Delta E_f = \frac{(y_{2*} - y_1)^3}{4y_1 y_{2*}} + \left(\frac{y_1 + y_{2*}}{2y_1 y_{2*}} \right) \frac{F_f}{\gamma} \quad (19)$$

La variable y_{2*} indica el tirante conjugado mayor con fricción.

IV. METODOLOGÍA

3.1 Materiales: Ubicación del experimento

El experimento se realizó en el Laboratorio de Recursos Hídricos del Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola (FIA) en la Universidad Nacional Agraria La Molina, en el distrito de La Molina cuya ubicación geográfica es:

12°04'55" S 76°56'53" O.

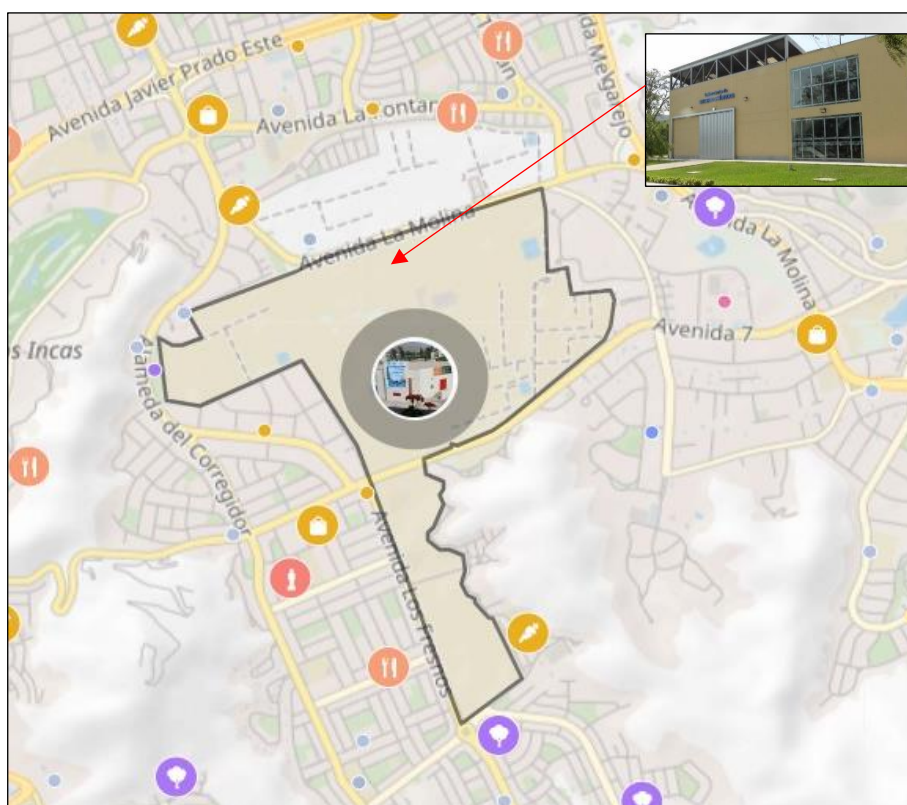


Figura 16: Croquis de ubicación del Laboratorio de Recursos Hídricos.
Fuente: Sygic maps, datos cartográficos.

3.2 Análisis exploratorio

El trabajo de investigación se realizó en condiciones de laboratorio mediante la formación del resalto hidráulico aguas abajo del aliviadero en un volumen de control, a efectos de comparar el comportamiento hidráulico de cuatro disipadores de energía, permutando tres

pendientes y dos caudales, los cuales llevaron a múltiples modelos de disipación de energía. Con este estudio se caracterizó el perfil de flujo en un canal de lecho horizontal que define las condiciones de un estado de disipación de energía y además se comparó la misma con el efecto de las pendientes, también se determinó el disipador de energía más adecuado para cada pendiente, descartando aquellas que tienen menor eficiencia, por lo demás, para cada variable existe un disipador de energía más eficiente que otros.

Se realizó primeramente una exploración de datos habiendo obtenido 341 registros de caudales (Q), tirantes (y_1, y_2) y longitud de resalto hidráulico (x_{y1}, x_{y2}). Se observó que existe una relación inversa entre los caudales (Q) y el Número de Froude (Fr_1), por lo cual se eligió los caudales de 11 l/s y 13 l/s por representar en su mayoría saltos estables.



Figura 17: Aliviadero tipo Creager con accesorios disipadores de energía
Fuente: *Discovers with Armfield. (s.f.) S Series: Applied hydraulics & hydrology.*

3.3 Disipadores de energía

Los modelos de disipadores de energía que se utilizaron fueron:

- Disipador Spillway Toe: A
- Disipador Ski Jump: B
- Disipador Energy Dispenser with Pegs: C
- Disipador Gravel Box Stop Logs: D

Todos estos disipadores de energía (A, B, C, D) se intercambiaron y se acoplaron al pie del aliviadero de demasías; fabricadas en plástico reforzado con fibra de vidrio, ocupando el total de la sección transversal del canal (300 mm), cada una posee una característica distinta en su género y cumple una función específica, se crean varios modelos de perfil de flujo a partir de caudales y pendientes. Por lo tanto, las pruebas experimentales en el laboratorio son indispensables para esta investigación, por medio de ellas se pudo observar, medir y entender el comportamiento hidráulico de los disipadores de energía.

3.3.1 Características Hidráulicas del Disipador de Energía A

El disipador de energía Spillway Toe, se ha nominado para esta investigación con la letra A.

El disipador de energía A presenta una superficie lisa de curvatura cóncava y muy corta, se convierte en la punta del aliviadero, se puede trabajar con caudales bajos y medios en el laboratorio, el Número de Froude máximo que alcanzó fue cinco.



Figura 18: Disipador Spillway Toe: A

3.3.2 Características Hidráulicas del Disipador de Energía B

El disipador de energía Ski Jump se ha nominado para esta investigación con la letra B.

El disipador de energía B presenta una superficie lisa, se diferencia del disipador A en que la curvatura cóncava se prolonga hasta alcanzar 93 mm de base. Durante las pruebas en el laboratorio se observó resaltos hidráulicos estables mayormente, tiene buen desarrollo en pendiente. El Número de Froude máximo que alcanzo es seis, en pendiente 1% llego a siete y en pendiente 2% hasta 9.9, con caudales de 7 l/s.



Figura 19: Disipador Ski Jump: B

3.3.3 Características Hidráulicas del Disipador de Energía C

El disipador de energía Energy Dispenser with Pegs se ha nominado para esta investigación con la letra C.

El disipador de energía C presenta obstáculos en el piso del disipador, son bloques deflectores localizados, conformado por 35 dados amortiguadores colocados de manera intercalada, 12 en la primera fila, 11 en la segunda fila y 12 en la tercera fila, su función es disipar la energía mediante una acción de impacto. Tiene una alta eficiencia hidráulica y útil en condiciones de lecho horizontal y de poca pendiente. El Número de Froude máximo que alcanzo es 4, y la disipación de energía es aproximadamente 30%.



Figura 20: Disipador Energy Dispenser with Pegs:C

3.3.4 Características hidráulicas del Disipador de Energía D

El disipador de energía Gravel Box Stop Logs se ha nominado para esta investigación con la letra D. Este disipador está conformado por un conjunto de bolas de vidrio de tamaño uniforme colocadas en una bandeja y aseguradas por una barrera terminal; sin embargo, estos materiales no fueron útiles para el experimento, debido al empuje hidrostático que ejerce el líquido sobre el cuerpo sumergido, al producirse la escorrentía, dichos elementos se elevaban hacia la superficie y se deslizaban a lo largo del canal.



Figura 21: Disipador Gravel Box Stop Logs: D (original)

En este trabajo de investigación se fabricó una estructura maciza hecha básicamente de concreto, con incrustaciones de piedras y gravas simulando un lecho natural y se colocó sobre la bandeja original como se observa en la *Figura 22*.

Este nuevo disipador presenta un colchón amortiguador de superficie rugosa y cumple el propósito del material de fabricación original.



Figura 22: Disipador D (adaptado)

El disipador de energía D tiene buen desarrollo con caudales de 9 l/s a 15 l/s y con pendientes, el número de Froude máximo que alcanza es de seis.

En la presente investigación se ha clasificado los disipadores de energía en dos grupos, aquellos disipadores de energía que tienen estructura lisa (disipadores A y B), las cuales se desprecia las fuerzas de fricción y aquellos que conforman el grupo de los disipadores de energía que tienen obstáculos en su estructura (disipadores C y D), en las cuales existe la fuerza de fricción. Cada disipador de energía tiene un comportamiento hidráulico específico, se obtuvo distintos modelos de perfil de flujo a partir de caudales y pendientes variables.

3.4 Especificaciones técnicas del canal de pendiente variable

El canal de pendiente variable tiene una longitud de 12.5 m. La sección transversal mide 300 mm de ancho y 450 mm de profundidad.

- Paredes: vidrio templado
- Cama: Fabricada exclusivamente en acero inoxidable.
- Depósitos finales: GRP (Plástico Reforzado con fibra de vidrio)
- Depósitos de pozos y tuberías: PVC (cloruro de polivinilo) y PE (polietileno)
- Bomba: centrífuga de acoplamiento cerrado
- Válvula de regulación de caudal: mariposa accionada por rueda manual
- + ve pendiente: 1:40 max (1.4 °) 2.5%
- -ve pendiente: 1: 200 max (0.28 °) 0.5%
- Medidor de flujo: electromagnético
- Caudal máximo 30 l/seg.
- Estabilidad de la cama: <1,0 mm (típica) a 400 mm de profundidad de agua
- Estabilidad de la pared lateral: <0.5mm (típico) a 400mm de profundidad de agua



Figura 23: Canal inclinado de vidrio lateral autónomo.



Figura 24: Sección del canal rectangular

Debajo del canal se encuentra la bomba centrífuga, la cual realiza la circulación del agua en el canal. El flujo se controla mediante una válvula de ajuste manual. El caudal se mide mediante la lectura de un medidor de flujo electromagnético, se visualiza en una pantalla digital que es parte de la consola de control. En dicha consola se ubica también los controles de la bomba y el botón de parada de emergencia.



Figura 25: Bomba centrífuga



Figura 26: Consola de control.

Los instrumentos de medición son los siguientes:

- Medidor de flujo con sensor electromagnético (l/s)
- Regla horizontal a lo largo del canal (mm)
- Limnómetro digital (mm)



Figura 27: Medidor de flujo (l/s)



Figura 28: Regla horizontal (mm)



Figura 29: Limnómetro digital (mm)

3.5 Metodología: Procedimiento de las pruebas experimentales

Para el procedimiento se tomó en cuenta el Manual de Instrucción del Canal de pendiente variable Armfield, las pruebas sirvieron para caracterizar el flujo y evaluar la disipación de energía.

- Se colocó el aliviadero de demasías y un dissipador de energía en el lecho del canal, haciendo el ajuste necesario para fijarlo y se selló los bordes con plastilina en los espacios que deja los laterales del canal y el vertedero aguas arriba.
- Se procedió a calibrar la pendiente en el marcador cero (posición horizontal) y también el limnómetro digital haciendo cero en el fondo del canal.
- Se encendió la bomba y se suministró agua al canal hasta rebosar el nivel de la cresta del vertedero, empezando el caudal 6 l/s que representa el 20% del caudal máximo, luego se procedió a fijar el caudal de trabajo, al final del canal se encuentra un dispositivo de regulación que sirve para posicionar el resalto hidráulico y formar un

salto claro, para ello el dispositivo de regulación hace las veces de un deflector de altura inclinado suficiente al final del canal.

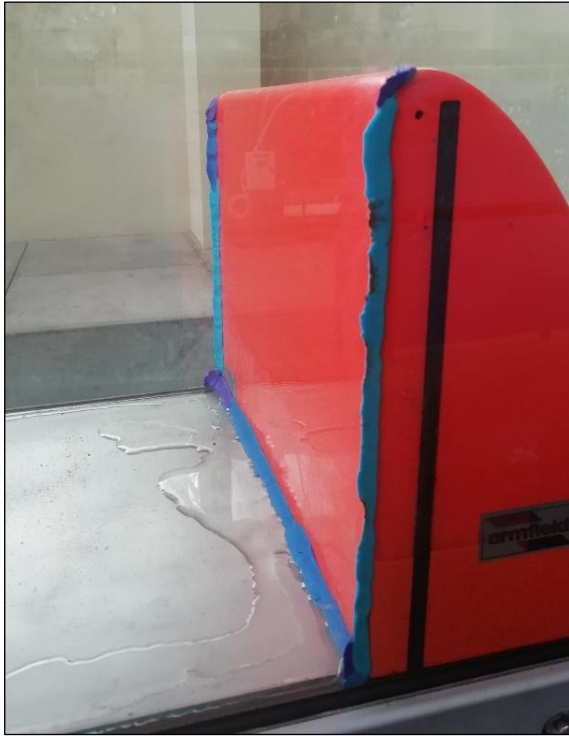


Figura 30: Sellado de los bordes con plastilina



Figura 31: Posición horizontal ($S = 0$)

La pendiente del canal se puede graduar con precisión, el valor se muestra con un señalizador adyacente al volante del pedestal de elevación. La escala está calibrada en pendiente positiva

y negativa, siendo la máxima pendiente positiva +ve 2.5% y la máxima pendiente negativa -ve 0.5%.



Figura 32: Encendido de la bomba

La bomba en modo encendido “pump run” permite el ingreso del agua al canal con la velocidad que señale el medidor de flujo, el cual se regula de acuerdo con el objetivo trazado, “stop” se usa alternativamente para detener la bomba de suministro de agua.

3.6 Registro de datos

El registro de datos se obtuvo tomando en cuenta el dissipador de energía, el caudal y la pendiente, en base a estas tres variables se formó el resalto hidráulico en un volumen de control y se registraron las mediciones directas con la lectura en ambas secciones de la altura y la longitud del resalto. Caudal medido (l/s): El caudal se obtuvo calibrando el medidor de flujo o caudalímetro digital de manera manual, hasta lograr estabilizar el flujo. Se hizo la lectura en cada prueba.

- Caudal (m^3/s): Para el registro se hizo la conversión del caudal medido l/s a m^3/s . ($1 \text{ l/s} = 0.001 \text{ m}^3/s$).
- Altura de referencia (h_w): Se midió por única vez la altura del aliviadero de demasías.
- Tirante conjugado (y_1, y_2): La medición se hizo de manera directa con el limnómetro.
- Longitud del resalto (Ls): El registro se hizo mediante la lectura longitudinal de ambas secciones.

Efectuada las mediciones y registradas en la tabla de datos, se procedió a repetir la operación en las mismas condiciones en seis réplicas. Luego se aumentó la descarga progresivamente hasta lograr el caudal permitido según el caso, con sus respectivas mediciones y réplicas.

Terminada la fase en canal horizontal, Se realizó todo el experimento anterior para pendientes $S_1 = 0.01$ y luego $S_2 = 0.02$.

Se procedió a intercambiar el disipador de energía y se realizó el mismo procedimiento anterior, completando las pruebas con los cuatro disipadores de energía.



Figura 33: Marcador 100, pendiente 1%



Figura 34: Marcador 50, pendiente 2%

3.7 Procesamiento de datos

Una vez obtenido el registro de datos completo y las fotos digitales, el siguiente paso consistió en el trabajo de gabinete donde se realizaron las mediciones indirectas por medio de las ecuaciones para calcular el número de Froude, las fuerzas específicas antes y después del resalto, las fuerzas de fricción y las características básicas del resalto hidráulico. Se realizaron pruebas preliminares haciendo una exploración de caudales, posteriormente se seleccionó los caudales idóneos para la investigación y se analizó cada uno de ellos.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el laboratorio se realizaron pruebas preliminares mediante la formación de resaltos hidráulicos y se evaluó en un volumen de control el comportamiento hidráulico de cada disipador de energía. El número de Froude ha sido el indicador adimensional determinante para la elección de los caudales, tomando en consideración que existe una relación positiva entre la disipación de energía y el número de Froude y de acuerdo con los objetivos planteados se buscó en la gama de caudales, que este indicador resulte el mayor posible en cada disipador y en cada pendiente, luego se procedió a elegir los caudales idóneos para la investigación. Los caudales elegidos fueron: 11 l/s y 13 l/s.

4.1 Análisis Exploratorio de Caudales para la Formación del Salto Hidráulico

El análisis exploratorio consistió evaluar y seleccionar los caudales representativos para la investigación mediante la observación, medición y registro de datos de los elementos del resalto hidráulico, se realizaron pruebas con caudales de 7 l/s hasta 29 l/s empleando los cuatro modelos de disipadores de energía.

Se halló que los valores mayores del número de Froude se encontraban en los caudales menores, sin embargo, hubo limitaciones en los disipadores A y C en caudales menores o iguales a 9 l/s, y en caudales medios y altos en el disipador C.



Figura 35: Vista del Disipador C, Salto Hidráulico $Q = 8.5$ l/s

El disipador de energía C presentó limitaciones en la formación de resaltos en caudales menores o iguales a 11 l/s y pendiente 2% debido al choque de la superficie del flujo con la altura de los bloques de impacto en la primera fila.

Otra de las limitaciones que se halló en el disipador C en comparación con los demás disipadores es que sólo forma resaltos oscilantes y débiles, y no se halló resaltos estables.

En este caso específico, se ha omitido el caudal de 11 l/s con pendiente 2% para el tratamiento de datos en este disipador.



Figura 36: Vista de Disipador A, Salto Hidráulico $Q = 7$ l/s

El disipador A presentó también una limitación en caudal de 7 l/s en lecho horizontal (ver Figura 36) y en caudales menores o iguales a 9 l/s en pendiente 2%, debido a que el nivel del tirante conjugado menor es fluctuante, por pasar muy cerca de la altura del disipador.

4.2 El número de Froude

En la exploración de caudales se halló que los saltos estables se encontraban mayormente en los caudales bajos y en algunos disipadores en caudales medios. En caudales altos, en la mayoría de ellos se halló resaltos oscilantes y débiles en la clasificación del número de Froude. En la Figura 37 se observa cuatro caudales representativos por cada disipador y los valores del Número de Froude con seis réplicas en lecho horizontal, en total 96 muestras.

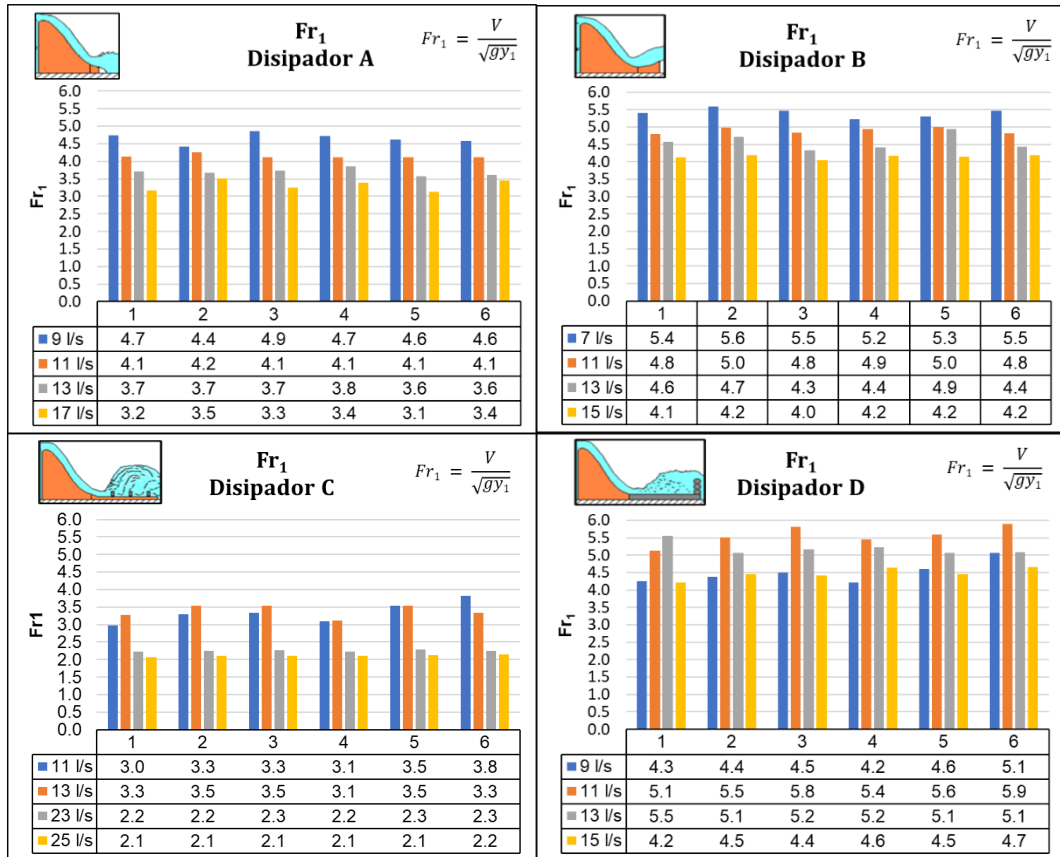


Figura 37: Figura representativa para el Número de Froude en el Salto Hidráulico.

4.3 Función Momentum (M)

En la Tabla 2 se observa que la función momentum en los disipadores A y B es la misma para ambas profundidades ($\Delta F_s = 0$) mientras en los disipadores C y D, no se mantienen constantes, $F_{s2} < F_{s1}$, debido a que existe una pérdida de energía adicional del flujo residual que son producidas por la fuerza de fricción ejercida en los bloques de impacto y por las gravas respectivamente.

Tabla 2: Función momentum (S=0) en los disipadores de energía

Disipador	Caudal Q (m ³ /s)	Tirante conjugado		N° Froude Fr ₁	Función momentum		ΔF _s
		C. menor y ₁ (m)	C. mayor y ₂ (m)		Sección 1	Sección 2	
					F _{s1}	F _{s2}	
A	0.011	0.020	0.108	4.1	0.002	0.002	0.000
A	0.011	0.019	0.107	4.2	0.002	0.002	0.000
A	0.011	0.020	0.108	4.1	0.002	0.002	0.000
A	0.011	0.020	0.107	4.1	0.002	0.002	0.000
A	0.011	0.020	0.107	4.1	0.002	0.002	0.000
A	0.011	0.020	0.108	4.1	0.002	0.002	0.000
A	0.013	0.024	0.120	3.7	0.002	0.003	0.000

A	0.013	0.024	0.120	3.7	0.002	0.003	0.000
A	0.013	0.024	0.118	3.7	0.002	0.003	0.000
A	0.013	0.024	0.118	3.8	0.003	0.003	0.000
A	0.013	0.025	0.120	3.6	0.002	0.003	0.000
A	0.013	0.024	0.118	3.6	0.002	0.003	0.000
B	0.011	0.018	0.108	4.8	0.002	0.002	-0.000
B	0.011	0.018	0.109	5.0	0.002	0.002	-0.000
B	0.011	0.018	0.108	4.8	0.002	0.002	-0.000
B	0.011	0.018	0.109	4.9	0.002	0.002	-0.000
B	0.011	0.018	0.107	5.0	0.002	0.002	-0.000
B	0.011	0.018	0.109	4.8	0.002	0.002	-0.000
B	0.013	0.021	0.120	4.6	0.003	0.003	-0.000
B	0.013	0.021	0.121	4.7	0.003	0.003	-0.000
B	0.013	0.022	0.121	4.3	0.003	0.003	-0.000
B	0.013	0.021	0.121	4.4	0.003	0.003	-0.000
B	0.013	0.020	0.121	4.9	0.003	0.003	-0.000
B	0.013	0.021	0.119	4.4	0.003	0.003	-0.000
C	0.011	0.025	0.073	3.0	0.002	0.001	-0.000
C	0.011	0.023	0.076	3.3	0.002	0.001	-0.000
C	0.011	0.023	0.073	3.3	0.002	0.001	-0.001
C	0.011	0.024	0.073	3.1	0.002	0.001	-0.000
C	0.011	0.022	0.073	3.5	0.002	0.001	-0.001
C	0.011	0.021	0.073	3.8	0.002	0.001	-0.001
C	0.013	0.026	0.082	3.3	0.002	0.002	-0.001
C	0.013	0.025	0.080	3.5	0.002	0.002	-0.001
C	0.013	0.025	0.079	3.5	0.002	0.002	-0.001
C	0.013	0.027	0.080	3.1	0.002	0.002	-0.001
C	0.013	0.025	0.081	3.5	0.002	0.002	-0.001
C	0.013	0.026	0.081	3.3	0.002	0.002	-0.001
D	0.011	0.017	0.083	5.1	0.002	0.002	-0.001
D	0.011	0.017	0.084	5.5	0.003	0.002	-0.001
D	0.011	0.016	0.083	5.8	0.003	0.002	-0.001
D	0.011	0.017	0.084	5.4	0.003	0.002	-0.001
D	0.011	0.016	0.083	5.6	0.003	0.002	-0.001
D	0.011	0.016	0.084	5.9	0.003	0.002	-0.001
D	0.013	0.018	0.096	5.5	0.003	0.002	-0.001
D	0.013	0.020	0.096	5.1	0.003	0.002	-0.001
D	0.013	0.019	0.097	5.2	0.003	0.002	-0.001
D	0.013	0.019	0.097	5.2	0.003	0.002	-0.001
D	0.013	0.020	0.097	5.1	0.003	0.002	-0.001
D	0.013	0.019	0.095	5.1	0.003	0.002	-0.001

C. menor: Conjugado menor; C. mayor: Conjugado mayor

$$\Delta F_s = F_{s2} - F_{s1}$$

F_{s1}: Fuerza específica o *momentum* al inicio del resalto

F_{s2}: Fuerza específica o *momentum* al final del resalto

4.4 Ecuación del Resalto Hidráulico en Canal Rectangular Horizontal

En la Figura 38 se observa una línea recta a excepción del extremo inferior, los valores experimentales corresponden a caudales de 11 l/s y 13 l/s, la ecuación representa la conservación del *momentum* dentro del resalto hidráulico expresada en la curva.

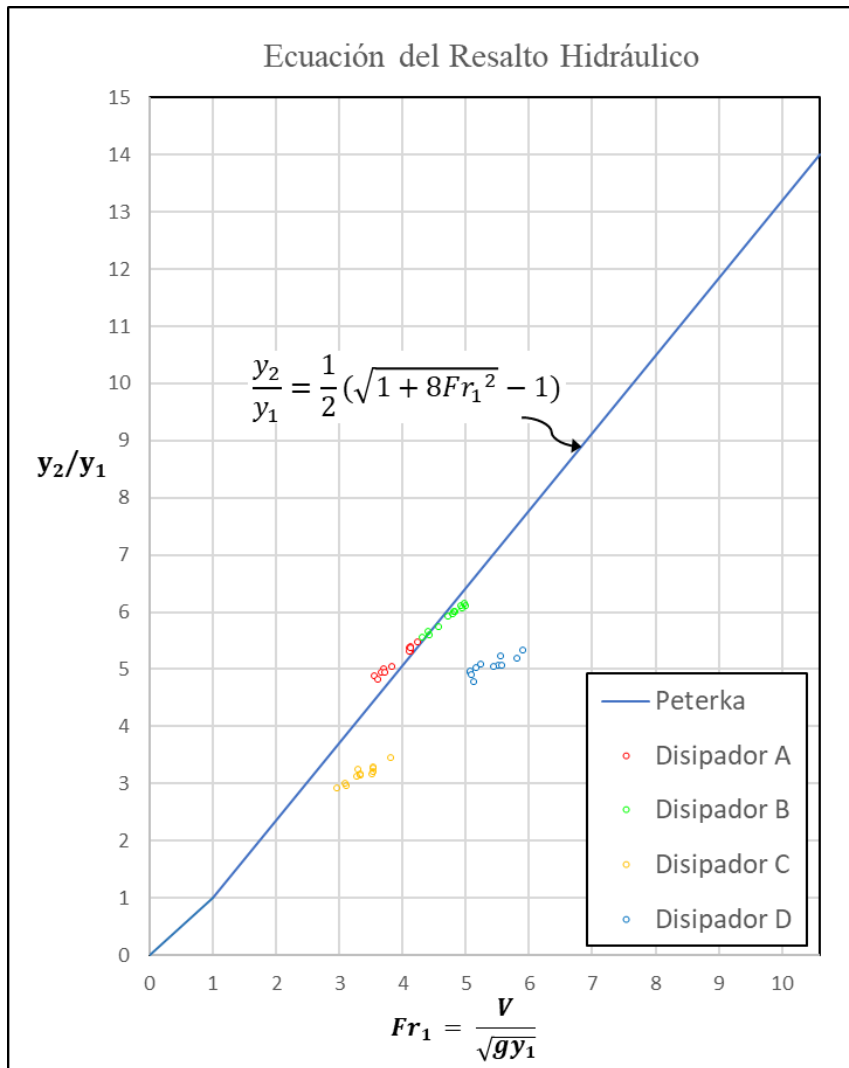


Figura 38: Ecuación del Resalto Hidráulico propuesta por Peterka (1984)

Existe una buena correlación de la curva con los valores experimentales de los disipadores A y B. Se halló discrepancias con respecto a los disipadores C y D, aunque hay plena formación del resalto, sin embargo, no satisfacen la ecuación, debido a que existen obstáculos dentro del volumen de control, estas fuerzas de fricción que no se debería despreciar. Sotelo (2002) argumenta que la ecuación del *momentum* es válida “cuando el salto hidráulico se produce en un canal horizontal prismático, sin obstáculo ni obstrucciones, donde la fuerza de fricción es despreciable”. En el caso del disipador C se puede tomar como referencia lo que Duarte (2011) afirma acerca de los disipadores de energía con bloques:

“presentan resistencia adicional al flujo residual que alcanza esta zona intermedia de la estructura, lo cual trae como consecuencia que la profundidad del flujo en el extremo final de la estructura sea menor”. En este caso la medida de la profundidad de flujo en el extremo final es y_2 , como se observa en la Figura 38, en la relación y_2/y_1 , los resultados de los disipadores C y D, se encuentran por debajo de la curva de Peterka.

El disipador D presenta también resistencia adicional al flujo por medio de las gravas que caracterizan una superficie con obstáculos. Según Duarte (2011) los resultados experimentales han mostrado que la disipación de energía que ocurre en un resalto hidráulico libre con fricción es aproximadamente 1.2-1.3 veces la disipación de energía en un resalto hidráulico libre sin fricción. “Esto significa que un resalto hidráulico libre con fricción sube menos el nivel del fluido y disipa más energía”.

4.5 Característica del salto hidráulico en el canal de lecho Horizontal

En este acápite se presentan los resultados experimentales medidos y calculados en función al número de Froude, para un mayor análisis se ha diferenciado los disipadores de superficie lisa (A y B) de los disipadores que presentan superficies con fricción (C y D).

Los resultados experimentales de los tirantes conjugados, la longitud del resalto, la altura del resalto son mediciones directas en laboratorio, se evalúan en términos del número de Froude y en la relación adimensional con el tirante conjugado menor.

Los valores experimentales calculados con las ecuaciones de la pérdida de energía, eficiencia, altura, se efectuaron en términos del número de Froude y en la relación adimensional con la energía específica antes del resalto.

4.5.1 Curvas Características del Resalto Hidráulico

Ven Te Chow (1994) presenta una familia de curvas para describir las características básicas del resalto hidráulico. “Las curvas características darán al diseñador una idea general de las condiciones en las cuales la estructura debe operarse”. Además, agrega que las curvas características fueron verificadas por el U. S. Bureau of Reclamation con datos obtenidos en seis canaletas de prueba. En la Tabla 3 se muestra los valores experimentales del tirante conjugado menor, la pérdida relativa, la eficiencia y la altura relativa del resalto hidráulico.

Tabla 3: Características básicas del resalto hidráulico

Disipador	Caudal	N° Froude	Conjugado	Pérdida	Eficiencia	Altura	
				Menor		Relativa	Relativa
				y_1/E_1		$\Delta E/E_1$	E_2/E_1
	Q (l/s)	Fr_1					
A	11.038	4.1	0.10	0.41	0.59	0.46	
A	10.846	4.2	0.10	0.42	0.58	0.45	
A	11.029	4.1	0.11	0.40	0.60	0.46	
A	11.003	4.1	0.11	0.41	0.59	0.46	
A	11.012	4.1	0.11	0.40	0.60	0.46	
A	11.028	4.1	0.11	0.41	0.59	0.46	
A	13.007	3.7	0.13	0.36	0.64	0.48	
A	13.014	3.7	0.13	0.35	0.65	0.48	
A	13.004	3.7	0.13	0.36	0.64	0.48	
A	13.014	3.8	0.12	0.37	0.63	0.47	
A	12.997	3.6	0.14	0.34	0.66	0.48	
A	13.007	3.6	0.13	0.34	0.66	0.48	
B	11.022	4.8	0.08	0.47	0.53	0.42	
B	11.014	5.0	0.07	0.49	0.51	0.41	
B	11.025	4.8	0.08	0.48	0.52	0.42	
B	11.017	4.9	0.08	0.49	0.51	0.42	
B	10.994	5.0	0.07	0.49	0.51	0.41	
B	11.024	4.8	0.08	0.47	0.53	0.42	
B	13.027	4.6	0.09	0.45	0.55	0.44	
B	13.058	4.7	0.08	0.47	0.53	0.43	
B	13.009	4.3	0.10	0.43	0.57	0.45	
B	12.890	4.4	0.09	0.44	0.56	0.44	
B	13.007	4.9	0.08	0.49	0.51	0.42	
B	13.004	4.4	0.09	0.44	0.56	0.44	
C	11.014	3.0	0.18	0.25	0.75	0.50	
C	11.007	3.3	0.16	0.30	0.70	0.50	
C	11.000	3.3	0.15	0.31	0.69	0.49	
C	10.984	3.1	0.17	0.27	0.73	0.50	
C	11.010	3.5	0.14	0.33	0.67	0.49	
C	10.995	3.8	0.12	0.37	0.63	0.47	
C	13.030	3.3	0.16	0.30	0.70	0.50	
C	13.000	3.5	0.14	0.33	0.67	0.49	
C	13.021	3.5	0.14	0.33	0.67	0.49	
C	13.003	3.1	0.17	0.27	0.73	0.50	
C	12.975	3.5	0.14	0.33	0.67	0.49	
C	13.000	3.3	0.15	0.31	0.69	0.49	
D	11.021	5.1	0.07	0.50	0.50	0.41	
D	11.028	5.5	0.06	0.53	0.47	0.39	
D	11.019	5.8	0.06	0.55	0.45	0.38	
D	11.026	5.4	0.06	0.53	0.47	0.39	
D	11.040	5.6	0.06	0.54	0.46	0.39	

D	11.023	5.9	0.05	0.56	0.44	0.37
D	13.037	5.5	0.06	0.53	0.47	0.39
D	12.997	5.1	0.07	0.50	0.50	0.41
D	13.018	5.2	0.07	0.51	0.49	0.41
D	13.014	5.2	0.07	0.51	0.49	0.40
D	13.013	5.1	0.07	0.50	0.50	0.41
D	13.007	5.1	0.07	0.50	0.50	0.41

Las relaciones adimensionales en términos de E_1 dependen sólo del número de Froude. Las ecuaciones respectivas para el cálculo son:

Pérdida relativa:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{(8Fr_1^2(2 + Fr_1^2)) - ((8Fr_1^2 + 1)^{\frac{3}{2}} - 4Fr_1^2 + 1)}{8Fr_1^2(2 + Fr_1^2)} \quad (20)$$

Eficiencia

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8Fr_1^2 + 1)^{\frac{3}{2}} - 4Fr_1^2 + 1}{8Fr_1^2(2 + Fr_1^2)} \quad (21)$$

Altura del resalto hidráulico

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 3}{2 + Fr_1^2} \quad (22)$$

En la Figura 39 se muestran las curvas características del resalto hidráulico de los cuatro disipadores de energía y los valores experimentales del número de Froude vs las ecuaciones arriba mencionadas; en la parte superior se observa los valores experimentales en color amarillo y rojo, corresponden a la pérdida de energía relativa (valores en orden inverso) y eficiencia respectivamente, el centro en color celeste es la altura relativa y en la parte inferior se localiza la relación adimensional y_1/E_1 en color verde. Se observa que los valores experimentales coinciden en las respectivas curvas características del resalto hidráulico y presentan una concordancia perfecta.

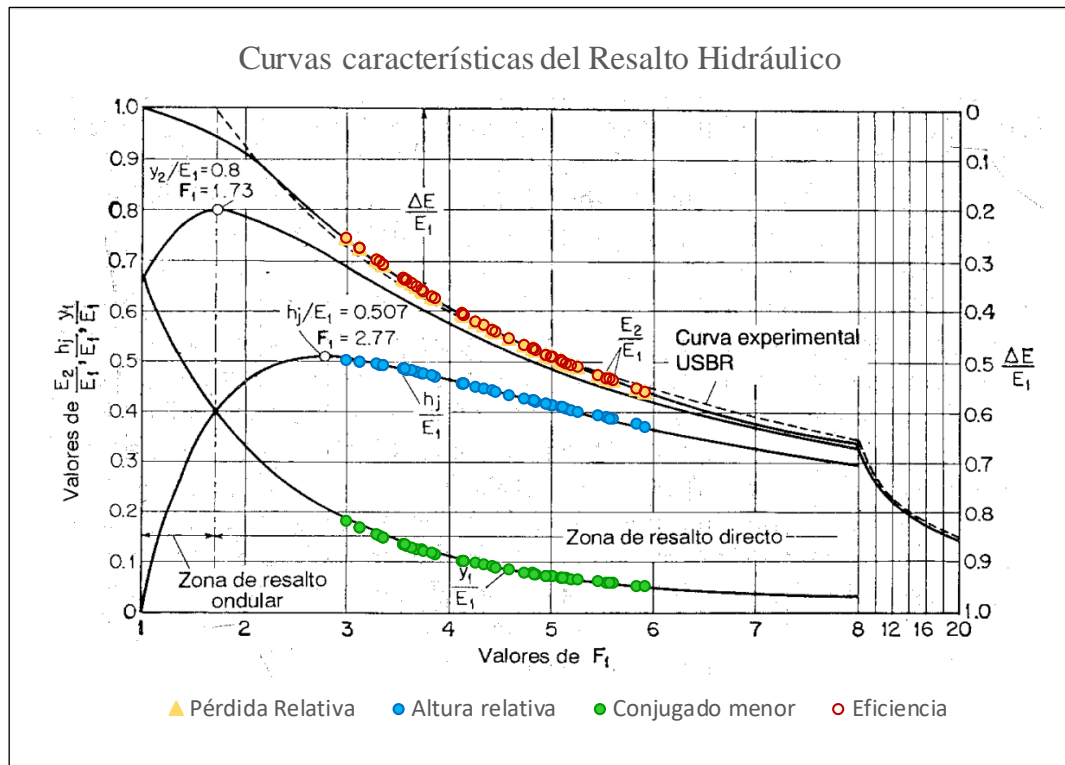


Figura 39: Curvas características del resalto hidráulico

La máxima altura relativa que alcanza la curva es de 0.507, esta ocurre cuando en número de Froude es 2.77, en esta investigación la máxima altura que alcanza es de 0.5 y el valor del número de Froude de 3.1 (disipador C).

4.5.2 Posición del Resalto Hidráulico

Existen tres modelos alternativos en la posición del resalto: caso 1 (claro), caso 2 (corrido) caso 3 (ahogado), para esta investigación se ha considerado desarrollar el caso 1. Referente a esta posición, Ven te Chow (1994) afirma que es un modelo ideal para proteger la estructura de posible socavación, para el cual “la profundidad y_2' es igual a la profundidad y_2 seciente a y_1 . Según Sotelo (2002) el caso 1 satisface la ecuación del *momentum* en un volumen de control, formándose el resalto inmediatamente al pie de la estructura.

En la Tabla 4 se presenta los valores experimentales de las medias de los caudales y tirante conjugado mayor en estudio, en base a esto se efectuó el cálculo del error absoluto y porcentual del tirante conjugado mayor, medido y calculado. Se observa que los disipadores A y B presentan errores porcentuales bajos, en comparación con los disipadores C y D cuyos porcentajes son mayores.

Tabla 4: Error porcentual y_2 : medido vs calculado

Disipador	Caudal	Medido	Calculado	Error absoluto	Error porcentual
	Q	y_2	y_{2c}	Δy	$\Delta y / y_2$
	(l/s)	(m)	(m)		% E
$y_{2c} = \frac{y_1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$					
A-11 l/s	10.993	0.107	0.107	0.00	0%
A-13 l/s	13.007	0.119	0.114	0.00	4%
B-11 l/s	11.016	0.108	0.115	0.01	6%
B-13 l/s	12.999	0.120	0.125	0.00	4%
C-11 l/s	11.002	0.073	0.098	0.02	34%
C-13 l/s	13.005	0.080	0.110	0.03	37%
D-11 l/s	11.026	0.083	0.121	0.04	46%
D-13 l/s	13.014	0.096	0.132	0.04	37%

y_2 : tirante conjugado mayor medido en el laboratorio.

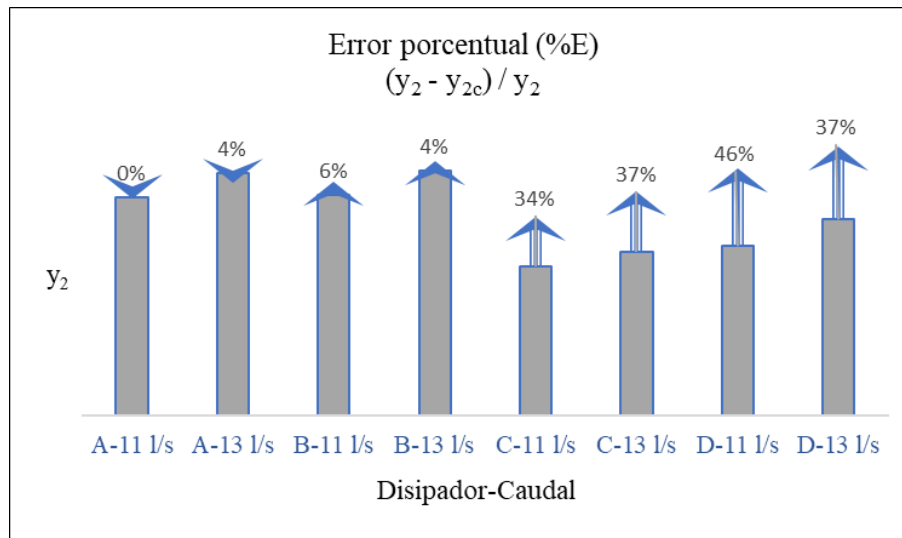


Figura 40: Error porcentual y_2 : (medido) vs (calculado)

En la Figura 40 se muestran las columnas que representan la magnitud del tirante conjugado mayor (y_2) por cada disipador y caudal. Las flechas en azul indican el porcentaje de error de y_{2c} con respecto de y_2 . Los disipadores C y D presentan porcentajes de error mayores que los disipadores A y B. Al existir diferencias en los cuatro disipadores el error estaría por imprecisión en la medición o por la reducción del tirante conjugado mayor debido al efecto de la fricción. En los disipadores C y D se observa errores porcentuales desde 34% hasta 46%, por lo cual es necesario analizar el efecto de la fricción y hallar un coeficiente de corrección.

En la Tabla 5 se observa que $y_2 \neq y_{2c}$ debido a que en el cálculo se estaría omitiendo el efecto de fricción que se produce principalmente en el fondo del lecho disipador.

Tabla 5: Comparación y_2 (medido) vs y_{2c} (calculado)

Disipador	Caudal	Nº Froude	Medido	Calculado
	Q	Fr ₁	y ₂	y _{2c}
	(l/s)		(m)	(m)
C	11.014	3.0	0.073	0.093
C	11.007	3.3	0.076	0.098
C	11.000	3.3	0.073	0.098
C	10.984	3.1	0.073	0.095
C	11.010	3.5	0.073	0.101
C	10.995	3.8	0.073	0.104
C	13.030	3.3	0.082	0.109
C	13.000	3.5	0.080	0.112
C	13.021	3.5	0.079	0.112
C	13.003	3.1	0.080	0.106
C	12.975	3.5	0.081	0.112
C	13.000	3.3	0.081	0.110
D	11.021	5.1	0.083	0.118
D	11.028	5.5	0.084	0.121
D	11.019	5.8	0.083	0.123
D	11.026	5.4	0.084	0.120
D	11.040	5.6	0.083	0.122
D	11.023	5.9	0.084	0.124
D	13.037	5.5	0.096	0.136
D	12.997	5.1	0.096	0.131
D	13.018	5.2	0.097	0.132
D	13.014	5.2	0.097	0.132
D	13.013	5.1	0.097	0.131
D	13.007	5.1	0.095	0.131

Comparación de y_2 en los disipadores de energía C y D
 y_2 es el tirante conjugado mayor medido en laboratorio
 y_{2c} es el tirante conjugado mayor calculado en la ecuación

En la Figura 41 se muestra en los resultados del tirante conjugado mayor (y_2) la relación entre el valor medido y calculado de los disipadores con obstáculo (C y D). Se tiene que el coeficiente de correlación es $\rho = 0.9365$, y el coeficiente de determinación $R^2 = 0.8771$. Existe una fuerte relación lineal positiva entre los datos, el 87.71% del valor de y_2 está relacionado al valor medido y_{2c} . El coeficiente de regresión: $a = 0.0128$ y $b = 0.611$.

$$y_2 = 0.611y_{2c} + 0.0128 \quad (23)$$

El error estándar de estimación es $S_{y.x} = 0.003$. Cuando se efectúa el cálculo de y_2 en base a y_{2c} se genera un error de estimación de ± 0.003 m (3 mm).

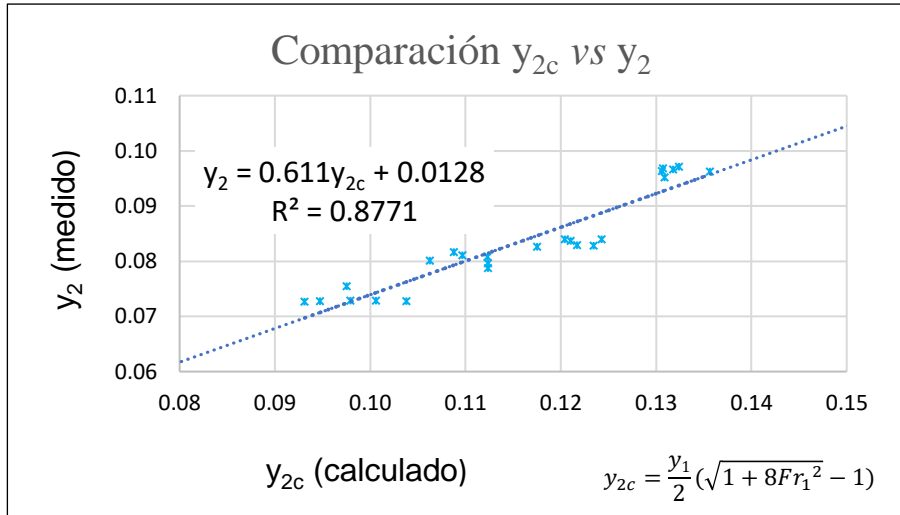


Figura 41: Comparación entre los resultados medido y calculado.

4.5.3 Tirantes Conjugados

Los tirantes conjugados mayor y menor son las profundidades del flujo al inicio y final del resalto. Disipadores con superficies lisas (A y B) y los disipadores con fricción (C y D).

Tabla 6: Tirantes Conjugados (Disipadores A, B)

Disipador	Caudal Q (l/s)	Tirantes conjugados		Froude	
		C. Menor y_1 (m)	C. Mayor y_2 (m)	Fr_1	y_2/y_1
A	11.038	0.020	0.108	4.1	5.4
A	10.846	0.019	0.107	4.2	5.5
A	11.029	0.020	0.108	4.1	5.4
A	11.003	0.020	0.107	4.1	5.3
A	11.012	0.020	0.107	4.1	5.3
A	11.028	0.020	0.108	4.1	5.4
A	13.007	0.024	0.120	3.7	5.0
A	13.014	0.024	0.120	3.7	4.9
A	13.004	0.024	0.118	3.7	4.9
A	13.014	0.024	0.118	3.8	5.0
A	12.997	0.025	0.120	3.6	4.9
A	13.007	0.024	0.118	3.6	4.8
B	11.022	0.018	0.108	4.8	6.0
B	11.014	0.018	0.109	5.0	6.2
B	11.025	0.018	0.108	4.8	6.0
B	11.017	0.018	0.109	4.9	6.1
B	10.994	0.018	0.107	5.0	6.1
B	11.024	0.018	0.109	4.8	6.0
B	13.027	0.021	0.120	4.6	5.7
B	13.058	0.021	0.121	4.7	5.9

B	13.009	0.022	0.121	4.3	5.6
B	12.890	0.021	0.121	4.4	5.7
B	13.007	0.020	0.121	4.9	6.1
B	13.004	0.021	0.119	4.4	5.6

Se consideran los disipadores A y B superficies lisas.

En la Tabla 6, se presenta los valores experimentales de los disipadores A y B de la superficie lisa; en cada disipador se observa que el número de Froude disminuye cuando aumenta el caudal, de la misma manera ocurre con la relación y_2/y_1 , la cual disminuye cuando el caudal crece. También se observa que los valores del Fr_1 son menores con respecto a y_2/y_1 .

Tabla 7: Tirantes Conjugados (Disipadores C, D)

Disipador	Caudal Q (l/s)	Tirantes conjugados		Froude	
		C. Menor	C, Mayor	Fr_1	y_2/y_1
		y_1 (m)	y_2 (m)		
C	11.014	0.025	0.073	3.0	2.9
C	11.007	0.023	0.076	3.3	3.2
C	11.000	0.023	0.073	3.3	3.2
C	10.984	0.024	0.073	3.1	3.0
C	11.010	0.022	0.073	3.5	3.3
C	10.995	0.021	0.073	3.8	3.4
C	13.030	0.026	0.082	3.3	3.1
C	13.000	0.025	0.080	3.5	3.2
C	13.021	0.025	0.079	3.5	3.2
C	13.003	0.027	0.080	3.1	3.0
C	12.975	0.025	0.081	3.5	3.3
C	13.000	0.026	0.081	3.3	3.1
D	11.021	0.017	0.083	5.1	4.8
D	11.028	0.017	0.084	5.5	5.1
D	11.019	0.016	0.083	5.8	5.2
D	11.026	0.017	0.084	5.4	5.0
D	11.040	0.016	0.083	5.6	5.1
D	11.023	0.016	0.084	5.9	5.3
D	13.037	0.018	0.096	5.5	5.2
D	12.997	0.020	0.096	5.1	4.9
D	13.018	0.019	0.097	5.2	5.0
D	13.014	0.019	0.097	5.2	5.1
D	13.013	0.020	0.097	5.1	5.0
D	13.007	0.019	0.095	5.1	4.9

Se consideran los disipadores C y D superficies con fricción.

En la Tabla 7 se observa que los valores del Fr_1 son mayores con respecto a y_2/y_1 en todos los casos, por lo tanto, no hay correlación alguna entre los valores de ambas tablas. Esto se debe al diseño de los disipadores, cuyas superficies están bien diferenciadas.

Los disipadores C y D presentan fricción (bloques y gravas) de manera tal que la profundidad del flujo en el extremo final (y_2) es menor comparado con disipadores de superficies lisas, la relación de tirantes conjugados y_2/y_1 también disminuye.

En la Figura 42 se observan dos tendencias lineales obtenidas del conjunto de datos de las tablas 23 y 24 correspondientes a los disipadores A, B, C y D, la línea celeste ($R^2=0.994$) para superficies lisas y la línea naranja ($R^2=0.9819$) para superficies con fricción.

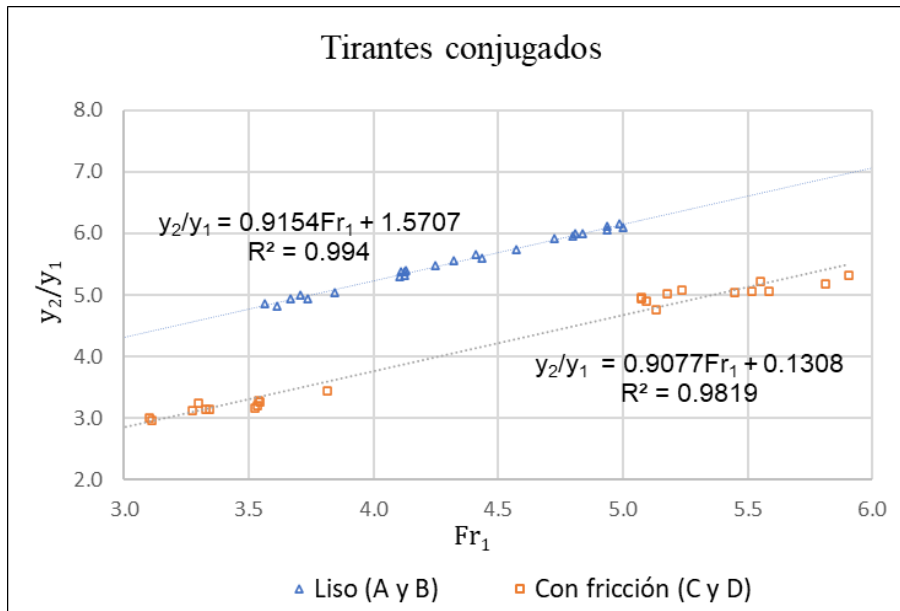


Figura 42: Tirantes conjugados en Superficies Lisas y con fricción

La ecuación para los tirantes conjugados en disipadores con superficie lisa (A y B):

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.9154Fr_1 + 1.5707 \quad (24)$$

La ecuación para los tirantes conjugados en disipadores de superficies con fricción (C y D):

$$\frac{y_{2f}}{y_1} = 0.9077Fr_1 + 0.1308 \quad (25)$$

Existe una relación alta positiva entre Fr_1 y y_2/y_1 en cada una de las tendencias. Se puede decir que la relación de tirantes conjugados y_2/y_1 dependen del número de Froude antes del resalto, en un 99.4% en los disipadores de superficies lisas y en 98.19% en los disipadores de superficies con fricción.

Se observa, además, que los valores experimentales de los disipadores con fricción (C, D) son menores que los lisos, debido al efecto de fricción en la superficie del disipador, los resultados son menores en el tirante final (y_2).

Los resultados del número de Froude están en la clasificación de resaltos oscilantes y estables, Los disipadores A y C se ubican en los oscilantes, mientras que los disipadores B y D en los estables.

4.5.4 Longitud del Resalto Hidráulico

La longitud del resalto se ha estudiado considerando al número de Froude y la relación adimensional Ls/y_1 y Ls/y_2 según recomendaciones de U.S. Bureau of Reclamation. En la Tabla 8 se muestra la relación adimensional Ls/y_1 . Se observa que las longitudes (Ls) de los disipadores C y D son más cortas en relación con las longitudes (Ls) de los disipadores A y B. Es similar a la relación entre tirantes conjugados donde los tirantes más cortos se hallan en los disipadores C y D debido a las características del disipador (con fricción), se puede decir que las longitudes de resalto tienen un comportamiento diferente cuando los disipadores tienen obstáculos en la superficie de fondo.

Tabla 8: Longitud del resalto hidráulico (Ls/y_1)

Disipador	Q (l/s)	Ls (m)	Fr ₁	y ₁ (m)	Ls/y ₁
A	11.038	0.73	4.1	0.020	36.4
A	10.846	0.73	4.2	0.019	37.5
A	11.029	0.73	4.1	0.020	36.3
A	11.003	0.73	4.1	0.020	36.5
A	11.012	0.73	4.1	0.020	36.3
A	11.028	0.73	4.1	0.020	36.4
A	13.007	0.79	3.7	0.024	32.6
A	13.014	0.79	3.7	0.024	32.4
A	13.004	0.79	3.7	0.024	32.8
A	13.014	0.79	3.8	0.024	33.4
A	12.997	0.79	3.6	0.025	31.8
A	13.007	0.79	3.6	0.024	32.1
B	11.022	0.83	4.8	0.018	45.5
B	11.014	0.83	5.0	0.018	46.7
B	11.025	0.83	4.8	0.018	45.7
B	11.017	0.83	4.9	0.018	46.3
B	10.994	0.83	5.0	0.018	46.8
B	11.024	0.83	4.8	0.018	45.5
B	13.027	0.91	4.6	0.021	43.5
B	13.058	0.91	4.7	0.021	44.4
B	13.009	0.91	4.3	0.022	41.9
B	12.890	0.91	4.4	0.021	42.7
B	13.007	0.91	4.9	0.020	45.8
B	13.004	0.91	4.4	0.021	42.7

C	11.014	0.30	3.0	0.025	12.0
C	11.007	0.30	3.3	0.023	12.9
C	11.000	0.30	3.3	0.023	13.0
C	10.984	0.30	3.1	0.024	12.4
C	11.010	0.30	3.5	0.022	13.5
C	10.995	0.30	3.8	0.021	14.2
C	13.030	0.36	3.3	0.026	13.6
C	13.000	0.36	3.5	0.025	14.3
C	13.021	0.36	3.5	0.025	14.3
C	13.003	0.36	3.1	0.027	13.1
C	12.975	0.36	3.5	0.025	14.3
C	13.000	0.36	3.3	0.026	13.8
D	11.021	0.56	5.1	0.017	32.0
D	11.028	0.56	5.5	0.017	33.6
D	11.019	0.56	5.8	0.016	34.8
D	11.026	0.56	5.4	0.017	33.3
D	11.040	0.56	5.6	0.016	33.8
D	11.023	0.56	5.9	0.016	35.1
D	13.037	0.62	5.5	0.018	33.7
D	12.997	0.62	5.1	0.020	31.8
D	13.018	0.62	5.2	0.019	32.2
D	13.014	0.62	5.2	0.019	32.4
D	13.013	0.62	5.1	0.020	31.7
D	13.007	0.62	5.1	0.019	31.8

En la Figura 43 se observa dos tendencias lineales, existe una fuerte relación positiva entre las variables. Para los disipadores de superficies lisas y con fricción, la relación Ls/y_1 depende el 96.78% y 97.5% respectivamente del número de Froude.

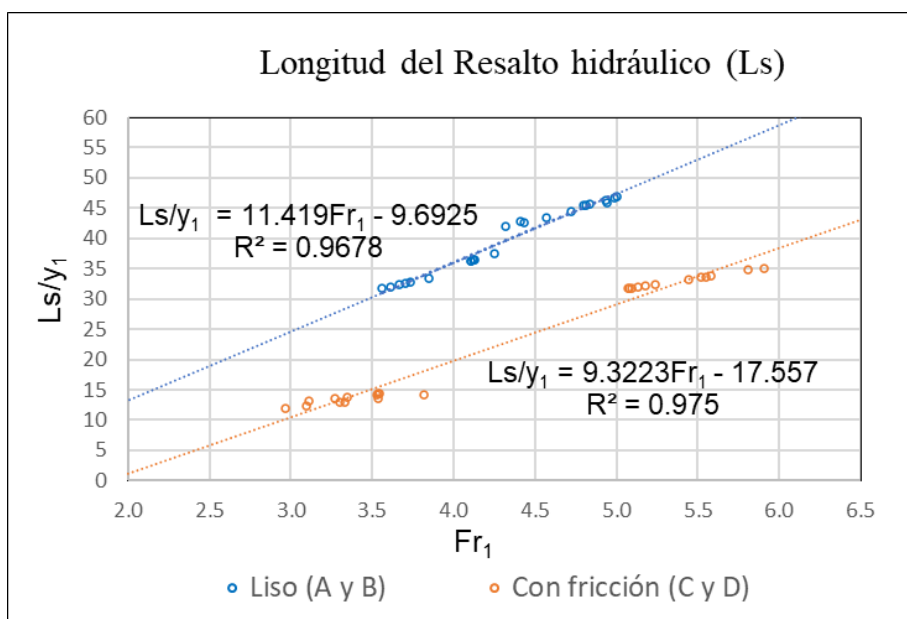


Figura 43: Longitud del Resalto Hidráulico (Ls/y_1) en superficies lisas y con fricción.

La ecuación de la longitud del resalto (L_s) en disipadores lisos (A y B) se expresa:

$$\frac{L_s}{y_1} = 11.419Fr_1 - 9.6925 \quad (26)$$

La ecuación de la longitud del resalto (L_{sf}) en disipadores con fricción (C y D) se expresa:

$$\frac{L_{sf}}{y_1} = 9.3223Fr_1 - 17.557 \quad (27)$$

En la Tabla 9 se observa que el disipador C presenta la longitud del resalto más corta, así también la relación L/y_2 y los valores del número de Froude son los menores, mientras que la longitud del resalto y los valores de la relación L/y_2 del disipador B superan a los demás resultados. La longitud del resalto crece con el aumento del caudal.

Tabla 9: Longitud del resalto hidráulico (L_s/y_2)

Disipador	Q	L_s	Fr_1	y_2	L_s/y_2
	(l/s)	(m)		(m)	
A	11.038	0.73	4.1	0.108	6.8
A	10.846	0.73	4.2	0.107	6.9
A	11.029	0.73	4.1	0.108	6.8
A	11.003	0.73	4.1	0.107	6.9
A	11.012	0.73	4.1	0.107	6.8
A	11.028	0.73	4.1	0.108	6.8
A	13.007	0.79	3.7	0.120	6.5
A	13.014	0.79	3.7	0.120	6.6
A	13.004	0.79	3.7	0.118	6.6
A	13.014	0.79	3.8	0.118	6.6
A	12.997	0.79	3.6	0.120	6.5
A	13.007	0.79	3.6	0.118	6.6
B	11.022	0.83	4.8	0.108	7.6
B	11.014	0.83	5.0	0.109	7.6
B	11.025	0.83	4.8	0.108	7.6
B	11.017	0.83	4.9	0.109	7.6
B	10.994	0.83	5.0	0.107	7.7
B	11.024	0.83	4.8	0.109	7.6
B	13.027	0.91	4.6	0.120	7.6
B	13.058	0.91	4.7	0.121	7.5
B	13.009	0.91	4.3	0.121	7.5
B	12.890	0.91	4.4	0.121	7.6
B	13.007	0.91	4.9	0.121	7.6
B	13.004	0.91	4.4	0.119	7.6
C	11.014	0.30	3.0	0.073	4.1
C	11.007	0.30	3.3	0.076	4.0
C	11.000	0.30	3.3	0.073	4.1
C	10.984	0.30	3.1	0.073	4.1

C	11.010	0.30	3.5	0.073	4.1
C	10.995	0.30	3.8	0.073	4.1
C	13.030	0.36	3.3	0.082	4.3
C	13.000	0.36	3.5	0.080	4.5
C	13.021	0.36	3.5	0.079	4.5
C	13.003	0.36	3.1	0.080	4.4
C	12.975	0.36	3.5	0.081	4.4
C	13.000	0.36	3.3	0.081	4.4
D	11.021	0.56	5.1	0.083	6.7
D	11.028	0.56	5.5	0.084	6.6
D	11.019	0.56	5.8	0.083	6.7
D	11.026	0.56	5.4	0.084	6.6
D	11.040	0.56	5.6	0.083	6.7
D	11.023	0.56	5.9	0.084	6.6
D	13.037	0.62	5.5	0.096	6.4
D	12.997	0.62	5.1	0.096	6.4
D	13.018	0.62	5.2	0.097	6.4
D	13.014	0.62	5.2	0.097	6.4
D	13.013	0.62	5.1	0.097	6.4
D	13.007	0.62	5.1	0.095	6.5

En la Figura 44 se observa los valores experimentales superpuestos en la curva de propuesta por Peterka para canal rectangular horizontal, basada en datos experimentales de seis canaletas de prueba en el laboratorio del U.S. Bureau of Reclamation y se halló que no existe ninguna correlación con la curva de la longitud de resalto en términos de y_2 debido a que los disipadores de energía planteados por el USBR están diseñados para profundidades del flujo y descargas mayores al diseño de los disipadores que se han realizado en esta investigación. Los valores experimentales se hallan en un rango relativamente corto del número de Froude en comparación con el rango que presenta la curva.

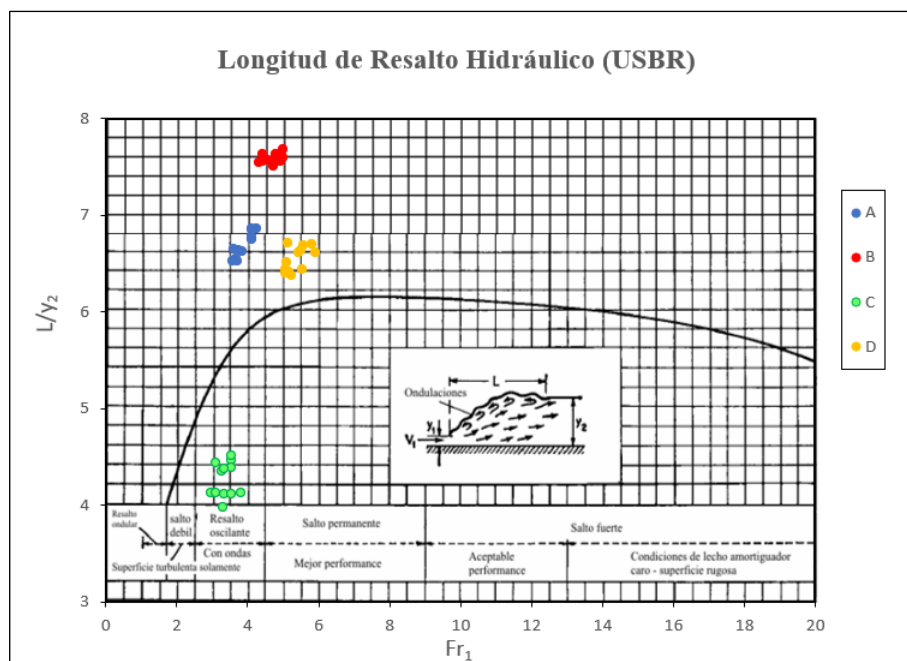


Figura 44: Longitud de resalto hidráulico (Ls/y_2), con base en los datos y recomendaciones del U.S. Bureau of Reclamation. (Ven te Chow, 1994)

En la Tabla 10 se reportan los datos obtenidos en el laboratorio (experimental) por medio de la lectura longitudinal entre tirantes conjugados y los resultados obtenidos del cálculo de las ecuaciones empíricas de distintos autores, se detalla el error relativo porcentual (E).

Tabla 10: Longitud del Resalto Hidráulico ($S= 0$)

Disipador	Disipador-caudal (l/s)							
	A-11	B-11	C-11	D-11	A-13	B-13	C-13	D-13
Smetana	0.52	0.54	0.30	0.40	0.57	0.60	0.33	0.46
Safranets	0.49	0.52	0.45	0.54	0.53	0.56	0.51	0.59
Einwachter	0.52	0.58	0.45	0.62	0.54	0.62	0.51	0.67
Chertousov	0.52	0.55	0.47	0.58	0.55	0.60	0.53	0.63
Wóycicki	0.68	0.70	0.39	0.52	0.74	0.77	0.43	0.60
USBR	0.60	0.62	0.35	0.46	0.66	0.69	0.38	0.53
Silvester	0.62	0.69	0.53	0.74	0.64	0.74	0.60	0.80
Peterka	0.60	0.63	0.39	0.50	0.65	0.69	0.43	0.57
Experimental	0.79	0.83	0.30	0.56	0.79	0.91	0.36	0.62

- Disipador A, $Q = 11$ l/s, Wóycicki, $E = 6.8\%$
- Disipador B, $Q = 11$ l/s, Wóycicki, $E = 15.7\%$
- Disipador C, $Q = 11$ l/s, Smetana, $E = 0\%$
- Disipador D, $Q = 11$ l/s, Safranets y Chertousov, $E = 3.6\%$
- Disipador A, $Q = 13$ l/s, Wóycicki, $E = 6.3\%$

- Disipador B, $Q = 13 \text{ l/s}$, Wóycicki, $E = 15.4\%$
- Disipador C, $Q = 13 \text{ l/s}$, USBR, $E = 5.6\%$
- Disipador D, $Q = 13 \text{ l/s}$, Chertousov, $E = 1.61\%$

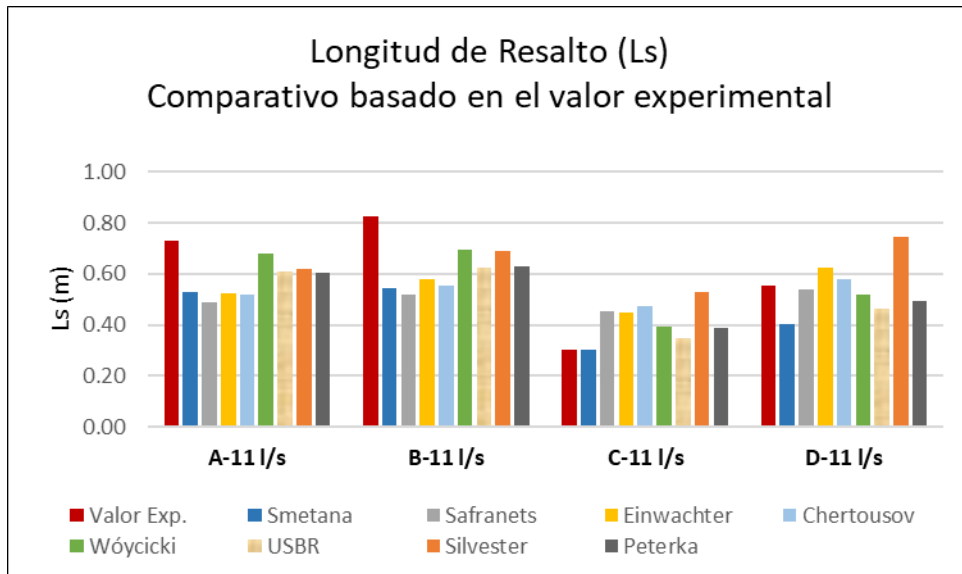


Figura 45: Longitud de Resalto Hidráulico ($Q = 11 \text{ l/s}$)

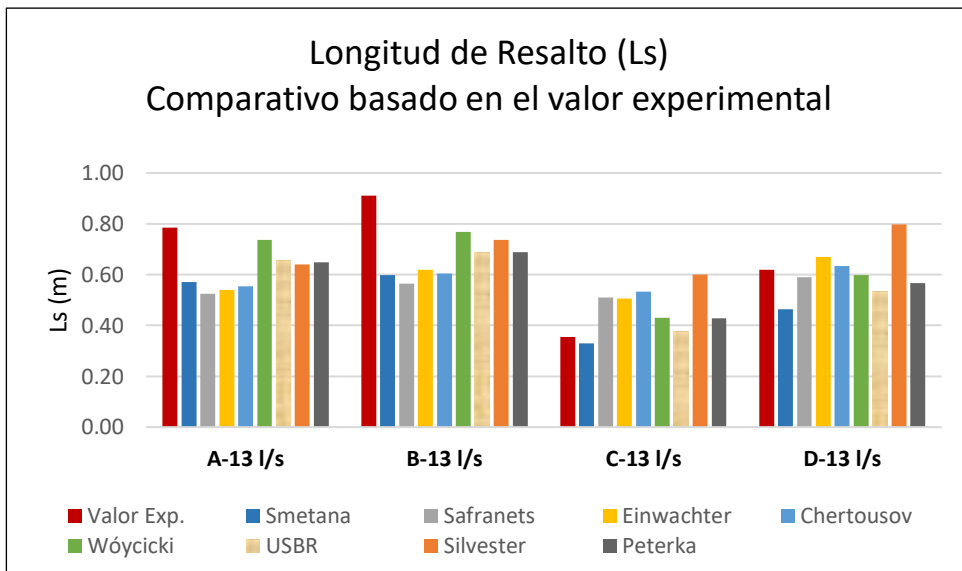


Figura 46: Longitud del Resalto Hidráulico ($Q = 13 \text{ l/s}$)

En las Figura 45 y Figura 46 se observan comparativamente la longitud del resalto experimental *versus* las longitudes calculadas con las ecuaciones empíricas vigentes.

En ambas figuras se observa claramente que el valor experimental del disipador B alcanza la mayor longitud. En el disipador C se muestra una longitud reducida debido al efecto de los bloques de impacto los cuales acortan la longitud del lecho disipador.

Las longitudes medidas de los disipadores A y B son altas en comparación con las calculadas, se debe tener en cuenta el material del disipador, la superficie lisa puede afectar la longitud del resalto. Sotelo (2002) sostiene que “La determinación de la longitud del resalto ha recibido gran atención de los investigadores por su importancia en el diseño, pero hasta ahora no se ha desarrollado ningún procedimiento teórico satisfactorio para su cálculo”.

4.5.5 Altura del Resalto Hidráulico

Las mediciones de la altura del resalto son directas, se define como la diferencia entre los tirantes conjugados.

$$h_j = y_2 - y_1 \quad (28)$$

En la Tabla 11 se presenta la altura del resalto hidráulico en promedio para cada disipador y caudal determinado. El valor experimental máximo de la tabla es 0.10 m y se encuentra en el disipador B con 13 l/s.

Tabla 11: Altura del Resalto Hidráulico (h_j)

Q = 11 l/s		Q = 13 l/s	
Disipador	h_j (m)	Disipador	h_j (m)
A	0.087	A	0.095
B	0.090	B	0.100
C	0.050	C	0.055
D	0.067	D	0.077

h_j es la Altura promedio del resalto por cada caudal y disipador.

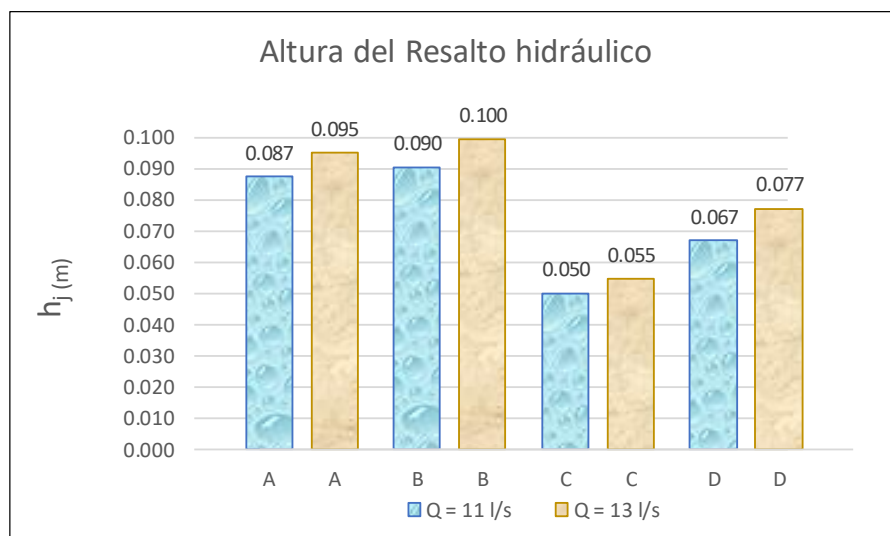


Figura 47: Altura del Resalto Hidráulico (h_j)

En la Figura 47 se observa que los disipadores A y B alcanzan alturas mayores que los disipadores C y D, esto se debe a la superficie lisa del disipador, los disipadores C y D

presentan superficies con bloques deflectores y gravas respectivamente, los cuales afectan principalmente la profundidad del tirante conjugado mayor.

En la Tabla 12 se observa que el número de Froude del flujo entrante tiene una relación inversa con el tirante conjugado menor. Alcanza la máxima altura del resalto cuando el número de Froude es el menor en la tabla.

La altura del resalto del dissipador B es el mayor de la tabla, está demostrado que en las mismas condiciones de descarga los dissipadores de superficie lisa (A y B) logran mayor altura que los dissipadores con obstáculos (C y D).

Tabla 12: Altura del Resalto Hidráulico

Disipador	Caudal Q (l/s)	N° Froude Fr ₁	Tirante conjugado		Altura del resalto	
			C. Menor	C. Mayor	h _j (m)	h _j /y ₁
			y ₁ (m)	y ₂ (m)		
A	11.038	4.1	0.020	0.108	0.088	4.40
A	10.846	4.2	0.019	0.107	0.087	4.48
A	11.029	4.1	0.020	0.108	0.088	4.37
A	11.003	4.1	0.020	0.107	0.086	4.31
A	11.012	4.1	0.020	0.107	0.087	4.31
A	11.028	4.1	0.020	0.108	0.088	4.38
A	13.007	3.7	0.024	0.120	0.096	4.00
A	13.014	3.7	0.024	0.120	0.096	3.94
A	13.004	3.7	0.024	0.118	0.094	3.94
A	13.014	3.8	0.024	0.118	0.095	4.04
A	12.997	3.6	0.025	0.120	0.096	3.87
A	13.007	3.6	0.024	0.118	0.094	3.82
B	11.022	4.8	0.018	0.108	0.090	4.96
B	11.014	5.0	0.018	0.109	0.091	5.15
B	11.025	4.8	0.018	0.108	0.090	5.00
B	11.017	4.9	0.018	0.109	0.091	5.11
B	10.994	5.0	0.018	0.107	0.090	5.10
B	11.024	4.8	0.018	0.109	0.090	4.99
B	13.027	4.6	0.021	0.120	0.099	4.74
B	13.058	4.7	0.021	0.121	0.101	4.91
B	13.009	4.3	0.022	0.121	0.099	4.55
B	12.890	4.4	0.021	0.121	0.099	4.66
B	13.007	4.9	0.020	0.121	0.101	5.06
B	13.004	4.4	0.021	0.119	0.098	4.59
C	11.014	3.0	0.025	0.073	0.048	1.91

C	11.007	3.3	0.023	0.076	0.052	2.24
C	11.000	3.3	0.023	0.073	0.050	2.15
C	10.984	3.1	0.024	0.073	0.049	2.00
C	11.010	3.5	0.022	0.073	0.051	2.28
C	10.995	3.8	0.021	0.073	0.052	2.45
C	13.030	3.3	0.026	0.082	0.055	2.12
C	13.000	3.5	0.025	0.080	0.055	2.21
C	13.021	3.5	0.025	0.079	0.054	2.16
C	13.003	3.1	0.027	0.080	0.053	1.96
C	12.975	3.5	0.025	0.081	0.056	2.26
C	13.000	3.3	0.026	0.081	0.055	2.15
D	11.021	5.1	0.017	0.083	0.065	3.77
D	11.028	5.5	0.017	0.084	0.067	4.06
D	11.019	5.8	0.016	0.083	0.067	4.19
D	11.026	5.4	0.017	0.084	0.067	4.04
D	11.040	5.6	0.016	0.083	0.067	4.05
D	11.023	5.9	0.016	0.084	0.068	4.32
D	13.037	5.5	0.018	0.096	0.078	4.23
D	12.997	5.1	0.020	0.096	0.077	3.94
D	13.018	5.2	0.019	0.097	0.077	4.01
D	13.014	5.2	0.019	0.097	0.078	4.08
D	13.013	5.1	0.020	0.097	0.077	3.96
D	13.007	5.1	0.019	0.095	0.076	3.89

A y B (Disipadores con superficies lisas)

C y D (Disipadores de superficies con obstáculos)

En la Figura 48 se observa que existe una alta relación entre el número de Froude del flujo entrante y la relación adimensional h_j/y_1 , tanto en superficies lisas como con fricción, los valores experimentales en color azul representan a los disipadores A y B, los cuales tienen en común la superficie lisa, se observa una tendencia lineal con $R^2 = 0.994$ y los disipadores C y D en color naranja también tiene tendencia lineal con $R^2 = 0.9819$. Esto significa que los valores experimentales de la relación h_j/y_1 en los disipadores A, B, C y D depende del número de Froude.

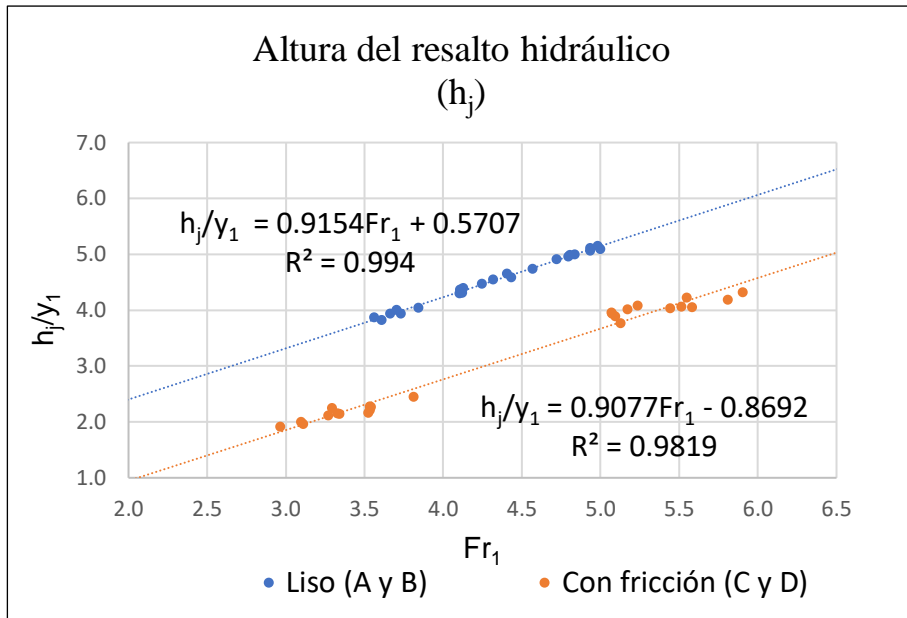


Figura 48: Altura del Resalto Hidráulico (Liso y con fricción)

La ecuación de la altura (h_j) en disipadores lisos (A y B):

$$\frac{h_j}{y_1} = 0.9154Fr_1 + 0.5707 \quad (29)$$

La ecuación de la altura (h_{jf}) en disipadores con fricción (C y D):

$$\frac{h_{jf}}{y_1} = 0.9077Fr_1 - 0.8692 \quad (30)$$

4.5.6 Pérdida de energía

Para el cálculo de la pérdida de energía relativa ($\Delta E_f/E_1$) se consideran además de las pérdidas internas, otro componente que es el factor de fricción (F_f) debido a las pérdidas por fricción en las paredes y el fondo del canal.

A continuación, en la Tabla 13 se reportan valores del factor de fricción para los diferentes disipadores de energía. Se observa que el disipador D presenta valores mayores que los demás disipadores.

Tabla 13: Factor de fricción (F_f)

Disipador	Caudal	Medido		Calculado	Factor de fricción
	Q	y_1	y_2	y_{2c}	F_f
	(l/s)	(m)	(m)	(m)	
				$y_{2c} = \frac{y_1}{2}(\sqrt{1+8Fr_1^2} - 1)$	$F_f = \frac{\gamma(y_2 - y_1)}{2y_2}(y_{2c} - y_2)(y_1 + y_2 + y_{2c})$

A	11.038	0.020	0.108	0.108	0.000
A	10.846	0.019	0.107	0.108	0.000
A	11.029	0.020	0.108	0.107	0.000
A	11.003	0.020	0.107	0.107	0.000
A	11.012	0.020	0.107	0.107	0.000
A	11.028	0.020	0.108	0.108	0.000
A	13.007	0.024	0.120	0.115	-0.001
A	13.014	0.024	0.120	0.114	-0.001
A	13.004	0.024	0.118	0.115	0.000
A	13.014	0.024	0.118	0.117	0.000
A	12.997	0.025	0.120	0.113	-0.001
A	13.007	0.024	0.118	0.113	0.000
B	11.022	0.018	0.108	0.114	0.001
B	11.014	0.018	0.109	0.116	0.001
B	11.025	0.018	0.108	0.115	0.001
B	11.017	0.018	0.109	0.116	0.001
B	10.994	0.018	0.107	0.116	0.001
B	11.024	0.018	0.109	0.115	0.001
B	13.027	0.021	0.120	0.125	0.001
B	13.058	0.021	0.121	0.127	0.001
B	13.009	0.022	0.121	0.122	0.000
B	12.890	0.021	0.121	0.123	0.000
B	13.007	0.020	0.121	0.129	0.001
B	13.004	0.021	0.119	0.124	0.000
C	11.014	0.025	0.073	0.093	0.001
C	11.007	0.023	0.076	0.098	0.001
C	11.000	0.023	0.073	0.098	0.002
C	10.984	0.024	0.073	0.095	0.001
C	11.010	0.022	0.073	0.101	0.002
C	10.995	0.021	0.073	0.104	0.002
C	13.030	0.026	0.082	0.109	0.002
C	13.000	0.025	0.080	0.112	0.002
C	13.021	0.025	0.079	0.112	0.002
C	13.003	0.027	0.080	0.106	0.002
C	12.975	0.025	0.081	0.112	0.002
C	13.000	0.026	0.081	0.110	0.002
D	11.021	0.017	0.083	0.118	0.003
D	11.028	0.017	0.084	0.121	0.003
D	11.019	0.016	0.083	0.123	0.004
D	11.026	0.017	0.084	0.120	0.003
D	11.040	0.016	0.083	0.122	0.003
D	11.023	0.016	0.084	0.124	0.004
D	13.037	0.018	0.096	0.136	0.004
D	12.997	0.020	0.096	0.131	0.003
D	13.018	0.019	0.097	0.132	0.003
D	13.014	0.019	0.097	0.132	0.004
D	13.013	0.020	0.097	0.131	0.003
D	13.007	0.019	0.095	0.131	0.003

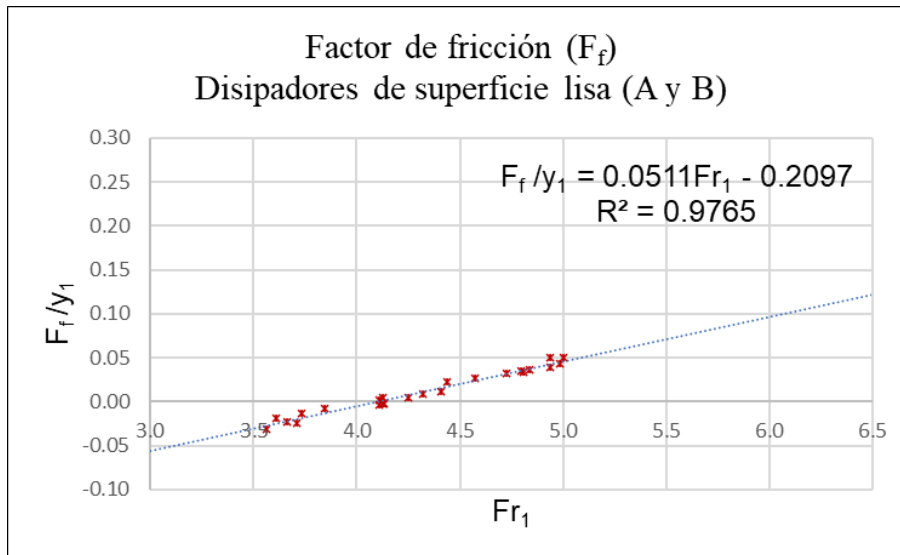


Figura 49: Factor de fricción en disipadores de superficie lisa

En la Figura 49 se observa la tendencia lineal del factor de fricción en disipadores de superficie lisa. Existe una alta relación positiva de la curva con los valores experimentales. ($R^2 = 0.9765$). Se observa la existencia de una relación positiva entre el caudal y la fuerza de fricción, cuando el caudal se incrementa, la fuerza de fricción también aumenta.

La ecuación que representa el factor de fricción para disipadores de superficie lisa es:

$$\frac{F_f}{y_1} = 0.0511Fr_1 - 0.2097 \quad (31)$$

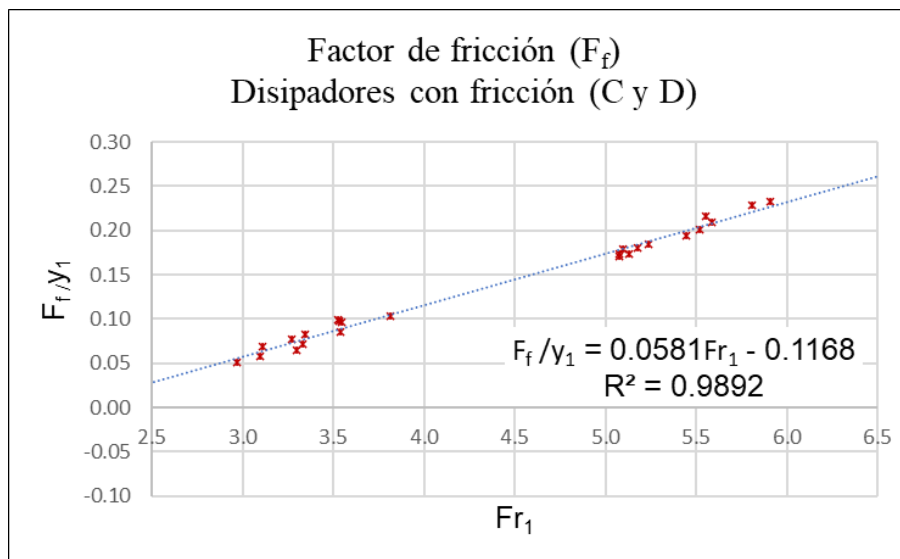


Figura 50: Factor de fricción en disipadores con fricción

La ecuación del factor de fricción para los disipadores con fricción es:

$$\frac{F_f}{y_1} = 0.0581Fr_1 - 0.1168 \quad (32)$$

En la Figura 50 se observa una tendencia lineal entre los valores experimentales del factor de fricción en los disipadores de superficies con fricción. El disipador C presenta bloques deflectores mientras que el disipador D gravas, ambos disipadores presentan fricción en sus diseños, se observa de la Tabla 13 que las fuerzas de fricción son mayores en el disipador D. Los valores del número de Froude se encuentran en el rango de 3.0-5.9, el disipador C presenta resaltos oscilantes mientras que el disipador D resaltos estables. Existe una alta relación positiva entre los datos. ($R^2 = 0.9892$).

En la Tabla 14 se ha calculado la pérdida de energía relativa con fricción ($\Delta E_f/E_1$) aplicando el factor de fricción (F_f) para calcular la pérdida residual debido a la fuerza de fricción con las paredes y el fondo del lecho disipador.

La pérdida de energía ΔE_f está conformado por dos componentes: las pérdidas internas del resalto hidráulico y la componente de fricción debido a las fuerzas de fricción de las paredes y el fondo del canal de la ecuación (19).

$$\Delta E_f = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} + \left(\frac{y_1 + y_2}{2y_1y_2} \right) \frac{F_f}{\gamma}$$

Tabla 14: Pérdida relativa de energía

Disipador	Caudal	Nº Froude	Pérdida de energía	Energía específica	Pérdida relativa
				$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g}$	$\Delta E_f/E_1$
	Q	Fr ₁	ΔE_f	E ₁	
	(l/s)			(m)	
A	11.038	4.1	0.08	0.19	0.40
A	10.846	4.2	0.08	0.20	0.42
A	11.029	4.1	0.08	0.19	0.40
A	11.003	4.1	0.08	0.19	0.41
A	11.012	4.1	0.08	0.19	0.41
A	11.028	4.1	0.08	0.19	0.40
A	13.007	3.7	0.06	0.19	0.33
A	13.014	3.7	0.06	0.19	0.32
A	13.004	3.7	0.07	0.19	0.34
A	13.014	3.8	0.07	0.20	0.36
A	12.997	3.6	0.05	0.18	0.30
A	13.007	3.6	0.06	0.18	0.32

B	11.022	4.8	0.11	0.23	0.50
B	11.014	5.0	0.12	0.24	0.52
B	11.025	4.8	0.12	0.23	0.50
B	11.017	4.9	0.12	0.23	0.51
B	10.994	5.0	0.12	0.24	0.52
B	11.024	4.8	0.11	0.23	0.50
B	13.027	4.6	0.11	0.24	0.47
B	13.058	4.7	0.12	0.25	0.49
B	13.009	4.3	0.10	0.22	0.43
B	12.890	4.4	0.10	0.23	0.44
B	13.007	4.9	0.14	0.26	0.52
B	13.004	4.4	0.11	0.23	0.46
C	11.014	3.0	0.05	0.14	0.37
C	11.007	3.3	0.06	0.15	0.42
C	11.000	3.3	0.07	0.15	0.43
C	10.984	3.1	0.05	0.14	0.39
C	11.010	3.5	0.08	0.16	0.47
C	10.995	3.8	0.09	0.17	0.51
C	13.030	3.3	0.07	0.17	0.42
C	13.000	3.5	0.09	0.18	0.47
C	13.021	3.5	0.09	0.18	0.48
C	13.003	3.1	0.06	0.16	0.40
C	12.975	3.5	0.08	0.18	0.47
C	13.000	3.3	0.07	0.17	0.44
D	11.021	5.1	0.15	0.25	0.62
D	11.028	5.5	0.17	0.27	0.65
D	11.019	5.8	0.19	0.29	0.67
D	11.026	5.4	0.17	0.26	0.64
D	11.040	5.6	0.18	0.27	0.66
D	11.023	5.9	0.20	0.29	0.68
D	13.037	5.5	0.20	0.30	0.65
D	12.997	5.1	0.16	0.27	0.61
D	13.018	5.2	0.17	0.28	0.61
D	13.014	5.2	0.17	0.28	0.62
D	13.013	5.1	0.16	0.27	0.60
D	13.007	5.1	0.17	0.27	0.61

ΔE_f = Pérdida de energía con fricción

E_1 = Energía específica al inicio del salto

$\Delta E_f/E_1$ = Pérdida relativa de energía con fricción

En la Figura 51 se observa notoriamente dos tendencias, una curva tiene alta concordancia ($R^2 = 0.9978$) con los valores experimentales de los disipadores A y B, son de superficie lisa y en la otra curva también tiene alta concordancia con los valores experimentales de los disipadores C y D ($R^2 = 0.9915$), se ha considerado los efectos de fricción y se observa que las pérdidas de energía son mayores en comparación con los disipadores de superficie lisa.

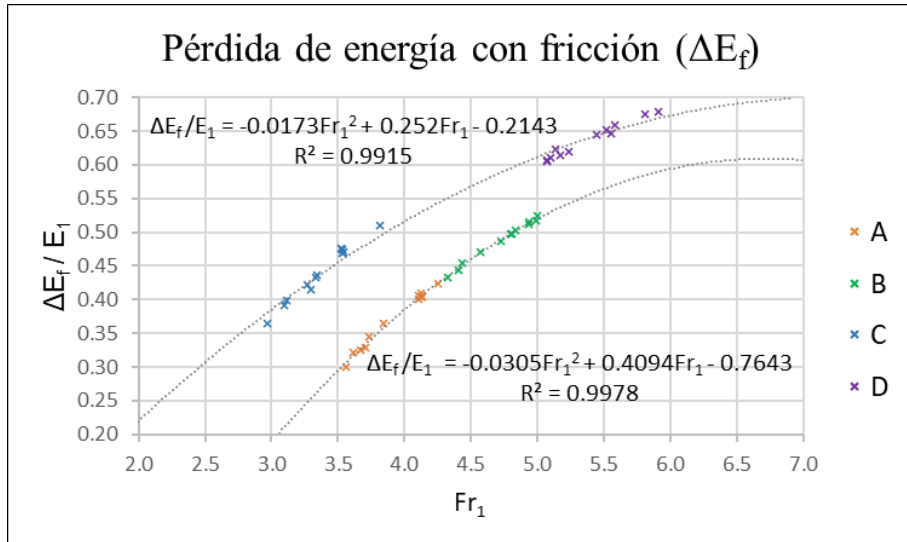


Figura 51: Pérdida de energía con fricción

La ecuación de la pérdida de energía para disipadores con superficies lisas (A y B):

$$\frac{\Delta E}{E_1} = -0.0305Fr_1^2 + 0.4094Fr_1 - 0.7643 \quad (33)$$

La ecuación de la pérdida de energía para disipadores con obstáculos (C y D):

$$\frac{\Delta E_f}{E_1} = -0.0173Fr_1^2 + 0.252Fr_1 - 0.2143 \quad (34)$$

El disipador D presenta mayores pérdidas de energía y los mayores valores del número de Froude del flujo entrante.

Tabla 15: Comparativo de la pérdida de energía (ΔE)

Disipador	Caudal	Ecuación del resalto		Ecuación de la energía
	Q (l/s)	ΔE (m)	ΔE_f (m)	ΔE (m)
		$\frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2}$	$\frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} + \left(\frac{y_1 + y_2}{2y_1y_2}\right) \frac{F_f}{\gamma}$	$\Delta E = E_1 - E_2$
A	11.038	0.08	0.08	0.08
A	10.846	0.08	0.08	0.08
A	11.029	0.08	0.08	0.08
A	11.003	0.08	0.08	0.08
A	11.012	0.08	0.08	0.08
A	11.028	0.08	0.08	0.08
A	13.007	0.08	0.06	0.06
A	13.014	0.07	0.06	0.06
A	13.004	0.07	0.07	0.07
A	13.014	0.08	0.07	0.07
A	12.997	0.07	0.05	0.05

A	13.007	0.07	0.06	0.06
B	11.022	0.09	0.11	0.11
B	11.014	0.10	0.12	0.12
B	11.025	0.09	0.12	0.12
B	11.017	0.10	0.12	0.12
B	10.994	0.10	0.12	0.12
B	11.024	0.09	0.11	0.11
B	13.027	0.10	0.11	0.11
B	13.058	0.10	0.12	0.12
B	13.009	0.09	0.10	0.10
B	12.890	0.10	0.10	0.10
B	13.007	0.11	0.14	0.14
B	13.004	0.09	0.11	0.11
C	11.014	0.01	0.05	0.05
C	11.007	0.02	0.06	0.06
C	11.000	0.02	0.07	0.07
C	10.984	0.02	0.05	0.05
C	11.010	0.02	0.08	0.08
C	10.995	0.02	0.09	0.09
C	13.030	0.02	0.07	0.07
C	13.000	0.02	0.09	0.09
C	13.021	0.02	0.09	0.09
C	13.003	0.02	0.06	0.06
C	12.975	0.02	0.08	0.08
C	13.000	0.02	0.07	0.07
D	11.021	0.05	0.15	0.15
D	11.028	0.05	0.17	0.17
D	11.019	0.06	0.19	0.19
D	11.026	0.05	0.17	0.17
D	11.040	0.05	0.18	0.18
D	11.023	0.06	0.20	0.20
D	13.037	0.07	0.20	0.20
D	12.997	0.06	0.16	0.16
D	13.018	0.06	0.17	0.17
D	13.014	0.06	0.17	0.17
D	13.013	0.06	0.16	0.16
D	13.007	0.06	0.17	0.17

En la Tabla 15 se hace un comparativo entre la ecuación del resalto sin fricción, la ecuación de resalto con fricción agregando la componente adicional que corresponde a las fuerzas de fricción y la última columna la ecuación de energía, queda demostrado que la diferencia de la energía específica antes y después del resalto es igual a los resultados de la ecuación del resalto agregando la componente adicional de la fuerza de fricción.

4.5.8 Eficiencia del resalto hidráulico

La eficiencia se evalúa considerando la pérdida de energía con fricción (ΔE_f). De la ecuación de la pérdida de energía con fricción se obtiene:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{E_1 - \Delta E_f}{E_1} \quad (35)$$

Tabla 16: Eficiencia del resalto con fricción

Disipador	Caudal	N° Froude	Pérdida de energía	Energía específica		Eficiencia
	Q			E_1	E_2	
	(l/s)	Fr_1	ΔE_f	(m)	(m)	E_2/E_1
A	11.038	4.1	0.08	0.19	0.11	0.60
A	10.846	4.2	0.08	0.20	0.11	0.58
A	11.029	4.1	0.08	0.19	0.11	0.60
A	11.003	4.1	0.08	0.19	0.11	0.59
A	11.012	4.1	0.08	0.19	0.11	0.59
A	11.028	4.1	0.08	0.19	0.11	0.60
A	13.007	3.7	0.06	0.19	0.13	0.67
A	13.014	3.7	0.06	0.19	0.13	0.68
A	13.004	3.7	0.07	0.19	0.13	0.66
A	13.014	3.8	0.07	0.20	0.13	0.64
A	12.997	3.6	0.05	0.18	0.13	0.70
A	13.007	3.6	0.06	0.18	0.13	0.68
B	11.022	4.8	0.11	0.23	0.11	0.50
B	11.014	5.0	0.12	0.24	0.11	0.48
B	11.025	4.8	0.12	0.23	0.11	0.50
B	11.017	4.9	0.12	0.23	0.11	0.49
B	10.994	5.0	0.12	0.24	0.11	0.48
B	11.024	4.8	0.11	0.23	0.11	0.50
B	13.027	4.6	0.11	0.24	0.13	0.53
B	13.058	4.7	0.12	0.25	0.13	0.51
B	13.009	4.3	0.10	0.22	0.13	0.57
B	12.890	4.4	0.10	0.23	0.13	0.56
B	13.007	4.9	0.14	0.26	0.13	0.48
B	13.004	4.4	0.11	0.23	0.13	0.54
C	11.014	3.0	0.05	0.14	0.09	0.63
C	11.007	3.3	0.06	0.15	0.09	0.58
C	11.000	3.3	0.07	0.15	0.09	0.57
C	10.984	3.1	0.05	0.14	0.09	0.61
C	11.010	3.5	0.08	0.16	0.09	0.53
C	10.995	3.8	0.09	0.17	0.09	0.49
C	13.030	3.3	0.07	0.17	0.10	0.58
C	13.000	3.5	0.09	0.18	0.09	0.53
C	13.021	3.5	0.09	0.18	0.09	0.52
C	13.003	3.1	0.06	0.16	0.10	0.60

C	12.975	3.5	0.08	0.18	0.10	0.53
C	13.000	3.3	0.07	0.17	0.10	0.56
D	11.021	5.1	0.15	0.25	0.09	0.38
D	11.028	5.5	0.17	0.27	0.09	0.35
D	11.019	5.8	0.19	0.29	0.09	0.33
D	11.026	5.4	0.17	0.26	0.09	0.36
D	11.040	5.6	0.18	0.27	0.09	0.34
D	11.023	5.9	0.20	0.29	0.09	0.32
D	13.037	5.5	0.20	0.30	0.11	0.35
D	12.997	5.1	0.16	0.27	0.11	0.39
D	13.018	5.2	0.17	0.28	0.11	0.39
D	13.014	5.2	0.17	0.28	0.11	0.38
D	13.013	5.1	0.16	0.27	0.11	0.40
D	13.007	5.1	0.17	0.27	0.11	0.39

En la Tabla 16 se observa la eficiencia del resalto con fricción en los cuatro disipadores de energía, los cálculos se obtuvieron de los resultados de la pérdida de energía con fricción (ΔE_f) aplicada a la ecuación (35). La mayor energía disipada se halla en el disipador A, alcanza 0.70, mientras que el disipador D es el menos eficiente.

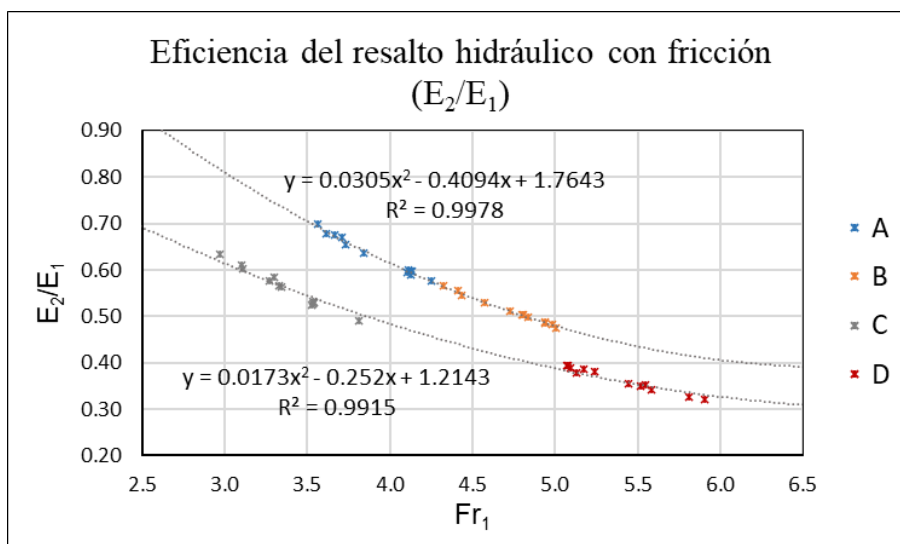


Figura 52: Eficiencia del resalto hidráulico con fricción

En la Figura 52 se muestran los valores experimentales en dos curvas, están separadas por el tipo de superficie. Las de menor eficiencia se hallan en los disipadores C y D (gris y rojo), y las más eficientes en los disipadores A y B (azul y naranja), son de superficies lisas. Existe una alta relación negativa de la curva con los resultados. $R^2 = 0.9978$ (superficies lisas) y $R^2 = 0.9915$ (superficies con fricción). La eficiencia del resalto depende de la superficie y del número de Froude.

La ecuación de la eficiencia del resalto en disipadores de superficies lisas (A y B):

$$\frac{E_2}{E_1} = 0.0305Fr_1^2 - 0.4094Fr_1 + 1.7643 \quad (36)$$

La ecuación de la eficiencia del resalto en disipadores con fricción (C y D):

$$\frac{E_{2f}}{E_1} = 0.0173Fr_1^2 - 0.252Fr_1 + 1.2143 \quad (37)$$

4.5.7 Disipación de Energía

La disipación de energía (%Disipación) es la pérdida relativa de energía expresada en porcentaje.

$$\%Disipación = \frac{\Delta E}{E_1} 100 \quad (38)$$

Aplicando la pérdida de energía relativa ($\Delta E_f/E_1$) expresado en porcentaje, se tiene el siguiente gráfico.

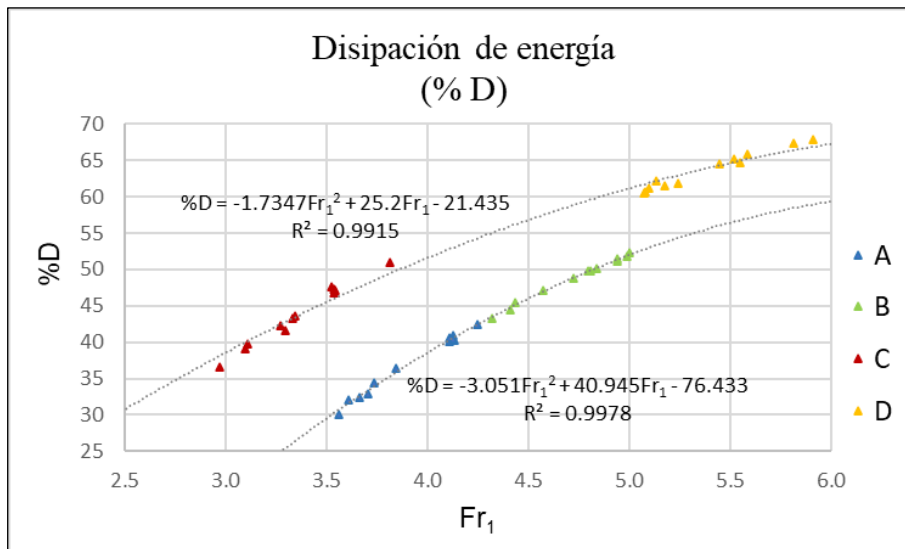


Figura 53: Disipación de energía en disipadores con superficie lisa y con fricción

En la Figura 53 se observa el porcentaje de la disipación de energía en los disipadores A y B considerados de superficie lisa y los disipadores C y D de superficie con fricción. Existe una alta relación positiva entre las curvas y los valores experimentales en ambos grupos, esto significa que si se incrementa el número de Froude la energía disipada tiende a aumentar. Se

puede afirmar que el porcentaje de disipación de energía depende del número de Froude. Los valores experimentales de los disipadores B y D demuestran esta afirmación; sin embargo, al analizar los disipadores A y C, se observa que existe un rango de diferencias significativas en la disipación de energía entre ambos para un mismo número de Froude, esto se debe a que el efecto de la fricción en el disipador C potencia aún más la disipación de energía.

La ecuación de la disipación de energía para disipadores con superficies lisas (A y B):

$$\% \text{ Disipación} = -3.051Fr_1^2 + 40.945Fr_1 - 76.433 \quad (39)$$

La ecuación de la disipación de energía para disipadores con fricción (C y D):

$$\% \text{ Disipación}_f = -1.7347Fr_1^2 + 25.2Fr_1 - 21.435 \quad (40)$$

4.6 Resultados Experimentales en Canal con Pendiente Variable

En la primera parte se analizó en lecho horizontal las características del resalto hidráulico generado por cuatro disipadores de energía y dos caudales, de esta manera, se obtuvieron ocho perfiles de flujo. En esta segunda parte de la investigación, se tiene el comportamiento hidráulico de los disipadores debido a la pendiente. Se obtuvo 23 perfiles de flujo en total.

En la Tabla 17 se muestra los modelos de resaltos hidráulicos formados, en total son 23, se omitió el perfil del flujo C-11, $S = 0.02$ (disipador C, caudal 11 l/s y pendiente 2%).

Tabla 17: Modelos de perfiles de flujo

Perfiles	Pendiente		
	S = 0	S = 0.01	S = 0.02
	Disipador-Caudal	Disipador-Caudal	Disipador-Caudal
1	A-11	A-11	A-11
2	B-11	B-11	B-11
3	C-11	C-11	-
4	D-11	D-11	D-11
5	A-13	A-13	A-13
6	B-13	B-13	B-13
7	C-13	C-13	C-13
8	D-13	D-13	D-13

Unidad de Caudal = l/s

4.6.1 Tirantes Conjugados considerando la pendiente

En este acápite se ha hecho un estudio comparativo de la relación entre tirantes conjugados (y_2/y_1) y el Número de Froude (Fr_1) con respecto a las pendientes. En cada una de las pendientes se han tomado seis réplicas por cada caudal, en total son 12 resultados por cada disipador como se muestra en la tabla.

En la Tabla 18 se muestra los resultados experimentales del disipador A, con la relación adimensional entre tirantes conjugados y el Número de Froude en el flujo entrante.

Tabla 18: Disipador A: Tirantes Conjugados en pendiente

Q (m ³ /s)	S = 0.01		S = 0.02	
	Fr ₁	y ₂ /y ₁	Fr ₁	y ₂ /y ₁
0.011	4.5	6.1	4.1	6.1
0.011	4.3	5.9	4.3	6.3
0.011	4.3	5.9	4.2	6.2
0.011	4.2	5.8	4.2	6.1
0.011	4.1	5.7	4.3	6.3
0.011	4.4	6.0	4.5	6.5
0.013	3.8	5.4	4.0	5.9
0.013	4.2	5.7	4.2	6.2
0.013	4.0	5.5	4.1	6.0
0.013	3.9	5.6	4.3	6.3
0.013	4.0	5.5	4.2	6.1
0.013	3.9	5.5	4.1	6.0

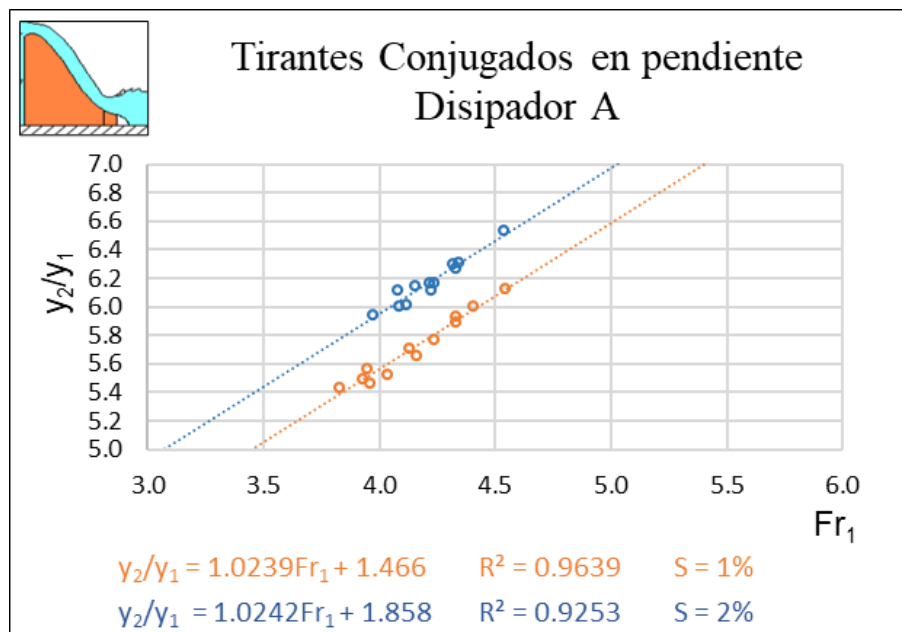


Figura 54. Disipador A: Tirantes Conjugados con Pendiente

En la Figura 54 se observa la tendencia lineal para el disipador A en diferentes pendientes, existe una alta relación positiva de los valores experimentales entre el número de Froude y

los tirantes conjugados. Los valores de la relación adimensional y_2/y_1 se hace mayor en la medida que la pendiente crece y alcanza los máximos valores cuando el caudal decrece.

La ecuación de los tirantes conjugados en pendiente $S = 0.01$:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.0239Fr_1 + 1.466 \quad (41)$$

La ecuación de los tirantes conjugados en pendiente $S = 0.02$:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.0242Fr_1 + 1.8582 \quad (42)$$

En la Tabla 19 se observa que la relación adimensional y_2/y_1 es casi constante entre pendientes mientras que el número de Froude varía.

Tabla 19: Disipador B: Tirantes Conjugados en pendiente

Q (m ³ /s)	S = 0.01		S = 0.02	
	Fr ₁	y ₂ /y ₁	Fr ₁	y ₂ /y ₁
0.011	5.5	7.2	5.7	7.8
0.011	4.9	6.7	5.8	7.8
0.011	5.9	7.4	6.0	8.1
0.011	5.6	7.3	5.8	7.9
0.011	5.5	7.2	5.8	7.8
0.011	6.0	7.5	6.1	8.2
0.013	4.6	6.1	5.4	7.4
0.013	4.7	6.2	5.1	7.1
0.013	4.9	6.4	5.2	7.1
0.013	4.7	6.3	5.0	7.0
0.013	4.8	6.3	5.1	7.1
0.013	4.8	6.3	5.0	7.0

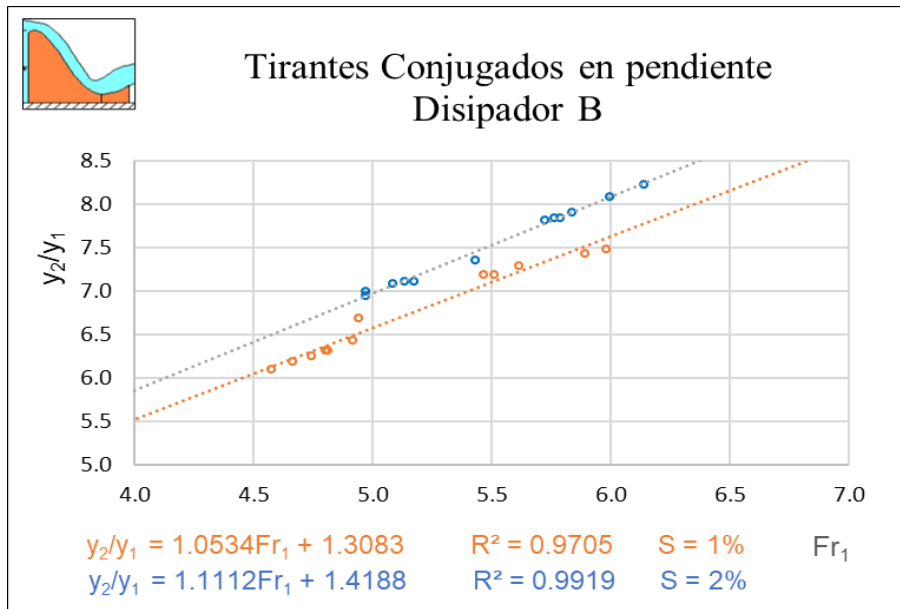


Figura 55: Disipador B: Tirantes Conjugados con pendiente

En la Figura 55 se observa que los valores experimentales en pendiente 2% presenta una relación alta positiva entre la línea y los resultados $R^2 = 0.9919$. La relación entre el número de Froude y los tirantes conjugados se correlacionan en la medida que crece la pendiente.

Tabla 20: Disipador C: Tirantes Conjugados en Pendiente

Q (m ³ /s)	S = 0.01		S = 0.02	
	Fr ₁	y ₂ /y ₁	Fr ₁	y ₂ /y ₁
0.013	3.1	3.6	3.5	4.1
0.013	3.0	3.5	3.4	4.1
0.013	3.2	3.7	3.4	4.0
0.013	3.1	3.6	3.7	4.2
0.013	2.9	3.4	3.1	3.9
0.013	3.3	3.7	3.6	4.2

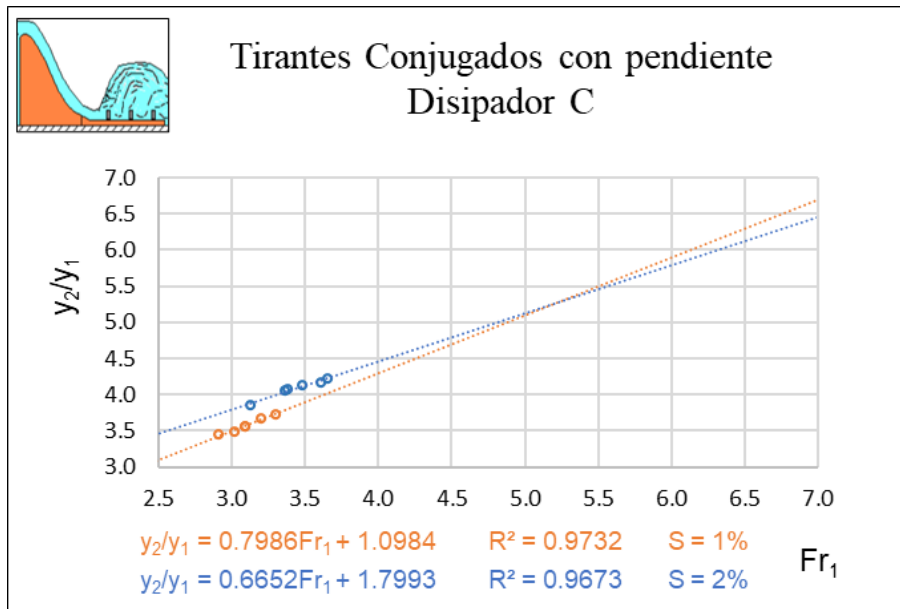


Figura 56: Disipador C: Tirantes Conjugados con Pendiente

En la Figura 56 se observa que los valores experimentales en pendiente 2% presenta una relación alta positiva entre la línea y los resultados $R^2 = 0.9673$.

Tabla 21: Disipador D: Tirantes Conjugados en Pendiente

Q (m ³ /s)	S = 0.01		S = 0.02	
	Fr ₁	y ₂ /y ₁	Fr ₁	y ₂ /y ₁
0.011	5.9	5.4	6.1	6.0
0.011	5.1	4.9	6.2	6.0
0.011	6.1	5.8	6.2	6.0
0.011	6.1	5.8	6.4	6.2
0.011	5.8	5.6	6.1	5.9
0.011	6.3	5.7	6.2	6.1
0.013	5.4	5.3	5.2	5.9
0.013	5.8	5.4	5.2	5.8
0.013	5.6	5.3	5.0	5.7
0.013	5.5	5.3	5.2	5.9
0.013	6.0	5.6	5.2	5.7
0.013	6.2	5.7	5.0	5.5

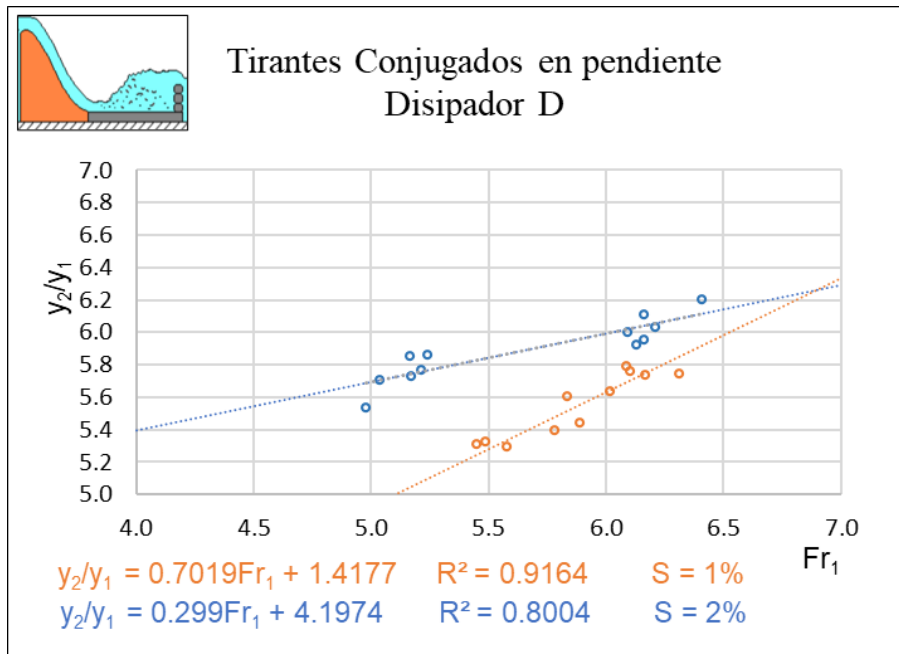


Figura 57: Disipador D: Tirantes Conjugados con Pendiente

En la Figura 57 se observa que en cuanto a la pendiente 1% existe una alta relación positiva entre el número de Froude y los tirantes conjugados y_2/y_1 ($R^2=0.9164$).

En pendiente 2% la relación entre tirantes conjugados con respecto al Fr_1 es más estable cuando se incrementa el Número de Froude.

4.6.2 Longitud del Resalto Hidráulico

En este acápite se analizará la longitud del resalto hidráulico con pendiente variable, en la Tabla 22 se detalla el número de Froude contra la relación adimensional Ls/y_1 para superficies lisas (disipador A y B) y en la Tabla 23 para superficies con fricción (disipadores C y D).

Se ha considerado en la tabla, caudales de 11 l/s y 13 l/s y pendientes de 1% y 2%.

En la Tabla 22 se observa que los valores del número de Froude se hallan en el rango de 3.6 a 6.1, y la relación Ls/y_1 entre 31.8 y 53.7, existe una relación positiva entre ambas variables.

Tabla 22: Longitud del resalto (Liso) en pendiente 1%, 2%

Disipador	Caudal	Pendiente	C. Menor	Longitud	N° Froude	
	Q	S ₀	y ₁	Ls	Fr ₁	Ls/y ₁
	(m ³ /s)	(%)	(m)	(m)		
A	0.011	1	0.019	0.74	4.5	39.5
A	0.011	1	0.019	0.74	4.3	38.2

A	0.011	1	0.019	0.74	4.3	38.2
A	0.011	1	0.020	0.74	4.2	37.7
A	0.011	1	0.020	0.74	4.1	37.1
A	0.011	1	0.019	0.74	4.4	38.9
A	0.013	1	0.024	0.88	3.8	37.1
A	0.013	1	0.022	0.88	4.2	39.2
A	0.013	1	0.023	0.88	4.0	37.9
A	0.013	1	0.023	0.88	3.9	37.9
A	0.013	1	0.023	0.88	4.0	38.4
A	0.013	1	0.023	0.88	3.9	37.8
B	0.011	1	0.017	0.82	5.5	49.6
B	0.011	1	0.018	0.82	4.9	46.4
B	0.011	1	0.016	0.82	5.9	52.2
B	0.011	1	0.016	0.82	5.6	50.5
B	0.011	1	0.017	0.82	5.5	49.9
B	0.011	1	0.016	0.82	6.0	52.6
B	0.013	1	0.021	0.91	4.6	43.5
B	0.013	1	0.021	0.91	4.7	44.0
B	0.013	1	0.020	0.91	4.9	45.7
B	0.013	1	0.020	0.91	4.7	44.6
B	0.013	1	0.020	0.91	4.8	45.0
B	0.013	1	0.020	0.91	4.8	45.0
A	0.011	2	0.020	0.78	4.1	38.6
A	0.011	2	0.019	0.78	4.3	39.9
A	0.011	2	0.020	0.78	4.2	39.2
A	0.011	2	0.020	0.78	4.2	38.8
A	0.011	2	0.020	0.78	4.3	39.8
A	0.011	2	0.019	0.78	4.5	41.1
A	0.013	2	0.023	0.88	4.0	38.2
A	0.013	2	0.022	0.88	4.2	40.0
A	0.013	2	0.023	0.88	4.1	39.0
A	0.013	2	0.022	0.88	4.3	40.6
A	0.013	2	0.022	0.88	4.2	39.9
A	0.013	2	0.022	0.88	4.1	39.2
B	0.011	2	0.016	0.82	5.7	51.1
B	0.011	2	0.016	0.82	5.8	51.4
B	0.011	2	0.016	0.82	6.0	52.8
B	0.011	2	0.016	0.82	5.8	51.8
B	0.011	2	0.016	0.82	5.8	51.6
B	0.011	2	0.015	0.82	6.1	53.7
B	0.013	2	0.019	0.90	5.4	48.2
B	0.013	2	0.020	0.90	5.1	46.1
B	0.013	2	0.019	0.90	5.2	46.7
B	0.013	2	0.020	0.90	5.0	45.5
B	0.013	2	0.019	0.90	5.1	46.5

Ls/y_1 es la relación adimensional de la longitud del resalto y el tirante conjugado menor.

Longitud del resalto (Ls), disipadores A y B con superficie lisa.

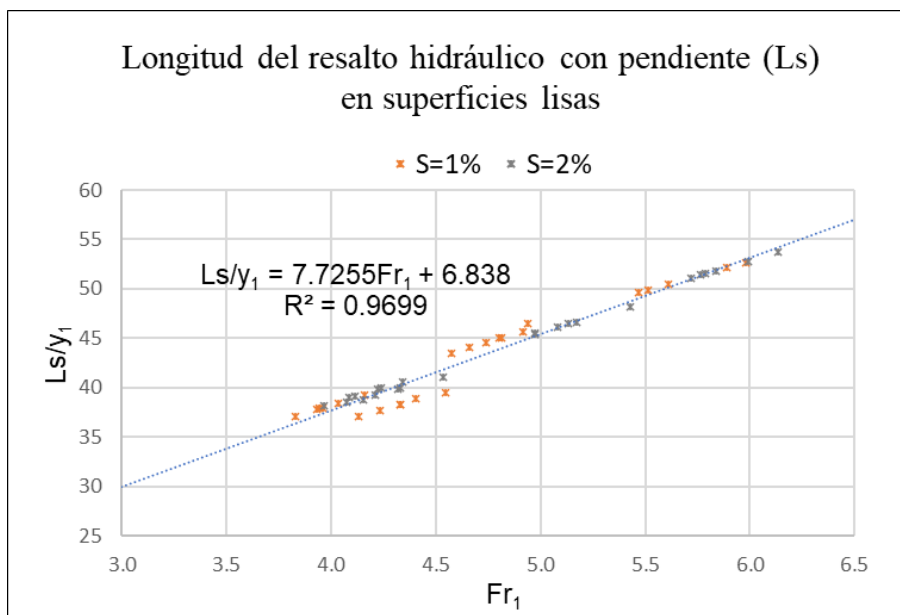


Figura 58: Longitud del resalto hidráulico con pendiente variable (A y B)

En la Figura 58 se observa que la línea de tendencia presenta una alta concordancia ($R^2 = 0.9699$); no obstante, se halló un mejor ajuste con los valores experimentales en pendiente 2%. Respecto a los valores experimentales de la pendiente 1% existe mayor dispersión cuando el valor del número de Froude es menor de cinco, y una alta concordancia cuando es mayor de cinco.

La ecuación para la longitud del resalto con baja pendiente es:

$$\frac{L_s}{y_1} = 7.7255Fr_1 + 6.838 \quad (43)$$

En la Tabla 23 se observa que los valores del número de Froude se hallan en el rango de 2.9 a 6.4, y la relación L_s/y_1 entre 10 y 42.8, existe una relación positiva entre ellos, los máximos valores se encuentran en pendiente 2%. Los valores del número de Froude menores a 3.8 corresponden al disipador C y los valores mayores a 5.0 corresponden al disipador D.

Tabla 23: Longitud del resalto (con fricción) en pendiente 1%, 2%

Disipador	Caudal	Pendiente	C. Menor	N° Froude		
	Q (m ³ /s)	S ₀ (%)	y ₁ (m)	Ls (m)	Fr ₁	Ls/y ₁
C	0.011	1	0.023	0.25	3.3	10.8
C	0.011	1	0.025	0.25	3.0	10.1
C	0.011	1	0.023	0.25	3.4	10.9
C	0.011	1	0.023	0.25	3.3	10.7
C	0.011	1	0.023	0.25	3.3	10.8

C	0.011	1	0.025	0.25	3.0	10.0
C	0.013	1	0.027	0.33	3.1	12.0
C	0.013	1	0.028	0.33	3.0	11.8
C	0.013	1	0.027	0.33	3.2	12.2
C	0.013	1	0.027	0.33	3.1	12.0
C	0.013	1	0.028	0.33	2.9	11.5
C	0.013	1	0.026	0.33	3.3	12.5
C	0.013	2	0.025	0.32	3.5	12.9
C	0.013	2	0.026	0.32	3.4	12.7
C	0.013	2	0.026	0.32	3.4	12.7
C	0.013	2	0.024	0.32	3.7	13.3
C	0.013	2	0.027	0.32	3.1	12.0
C	0.013	2	0.025	0.32	3.6	13.3
D	0.011	1	0.016	0.53	5.9	33.5
D	0.011	1	0.018	0.53	5.1	30.3
D	0.011	1	0.015	0.53	6.1	34.3
D	0.011	1	0.015	0.53	6.1	34.2
D	0.011	1	0.016	0.53	5.8	33.3
D	0.011	1	0.015	0.53	6.3	35.1
D	0.013	1	0.019	0.61	5.4	32.8
D	0.013	1	0.018	0.61	5.8	34.1
D	0.013	1	0.018	0.61	5.6	33.3
D	0.013	1	0.019	0.61	5.5	32.9
D	0.013	1	0.017	0.61	6.0	35.0
D	0.013	1	0.017	0.61	6.2	35.6
D	0.011	2	0.015	0.64	6.1	41.4
D	0.011	2	0.015	0.64	6.2	41.7
D	0.011	2	0.015	0.64	6.2	41.9
D	0.011	2	0.015	0.64	6.4	42.8
D	0.011	2	0.015	0.64	6.1	41.5
D	0.011	2	0.015	0.64	6.2	41.7
D	0.013	2	0.019	0.78	5.2	40.4
D	0.013	2	0.019	0.78	5.2	40.7
D	0.013	2	0.020	0.78	5.0	39.8
D	0.013	2	0.019	0.78	5.2	40.9
D	0.013	2	0.019	0.78	5.2	40.5
D	0.013	2	0.020	0.78	5.0	39.5

Ls/y_1 es la relación adimensional de la longitud del resalto y el tirante conjugado menor. Longitud del resalto (Ls) para los disipadores C y D con fricción.

En la Figura 59 se observa en el lado derecho el conjunto de valores experimentales del disipador D, existe mayor disipación en los resultados cuando se incrementa la pendiente, se observa que los valores experimentales de la pendiente 2% (color verde) en particular, con el caudal 13 l/s no cumple con lo recomendado. La longitud del resalto del disipador D es dos veces mayor que la longitud del resalto del disipador C, por lo demás existe una buena correlación con los datos.

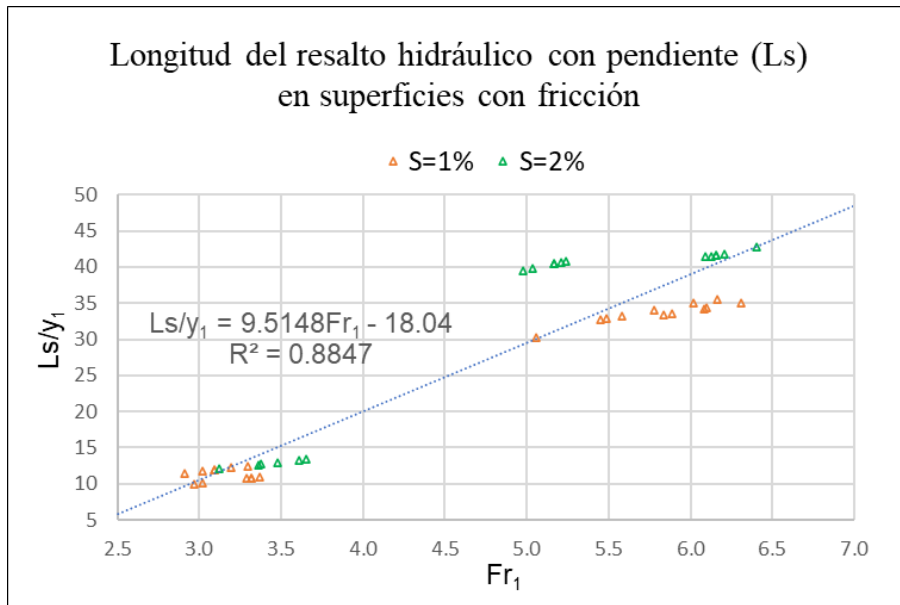


Figura 59: Longitud del resalto hidráulico con pendiente variable (C y D)

4.6.3 Altura del Resalto Hidráulico

La altura del resalto hidráulico es la diferencia entre los tirantes conjugados.

$$h_j = y_2 - y_1 \quad (44)$$

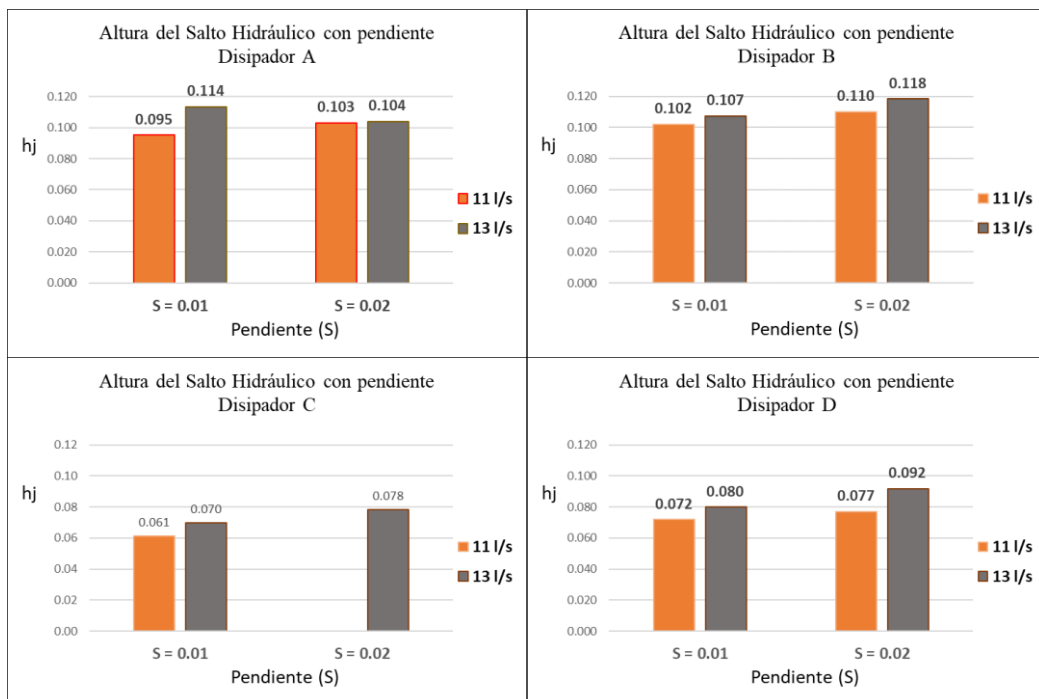


Figura 60: Altura del Salto Hidráulico con pendiente

En la Figura 60 se observa que la altura del Salto Hidráulico (h_j) aumenta con la pendiente en todos los disipadores en estudio. Se tiene que la máxima altura se encuentra en el disipador B con 0.118 m, seguido del disipador A. Los disipadores C y D presentan menor

tirante final (y_2) debido a la fricción (bloques y gravas respectivamente) en el colchón amortiguador.

Tabla 24: Altura del resalto hidráulico (A y B)

Disipador	Caudal	Pendiente	Nº Froude	Tirante Conjugado		Altura	
				C. Menor C. Mayor		h_j	h_j/y_1
				Fr_1	y_1		
Q	S	(l/s)	(%)	(m)	(m)	(m)	
A	11.035	1	4.5	0.019	0.115	0.097	5.13
A	11.045	1	4.3	0.019	0.115	0.096	4.93
A	11.038	1	4.3	0.019	0.115	0.095	4.89
A	11.047	1	4.2	0.020	0.114	0.094	4.77
A	11.008	1	4.1	0.020	0.114	0.094	4.71
A	10.960	1	4.4	0.019	0.115	0.096	5.01
A	13.021	1	3.8	0.024	0.128	0.105	4.44
A	13.038	1	4.2	0.022	0.126	0.104	4.66
A	13.019	1	4.0	0.023	0.126	0.103	4.47
A	12.990	1	3.9	0.023	0.129	0.105	4.57
A	13.020	1	4.0	0.023	0.126	0.103	4.53
A	12.995	1	3.9	0.023	0.127	0.104	4.49
B	11.001	1	5.5	0.017	0.119	0.103	6.19
B	10.990	1	4.9	0.018	0.119	0.101	5.69
B	10.995	1	5.9	0.016	0.117	0.102	6.43
B	11.013	1	5.6	0.016	0.119	0.103	6.30
B	11.002	1	5.5	0.017	0.119	0.102	6.19
B	11.026	1	6.0	0.016	0.117	0.102	6.48
B	13.001	1	4.6	0.021	0.128	0.107	5.10
B	13.017	1	4.7	0.021	0.128	0.107	5.19
B	12.993	1	4.9	0.020	0.128	0.108	5.43
B	13.001	1	4.7	0.020	0.128	0.107	5.25
B	12.997	1	4.8	0.020	0.128	0.108	5.32
B	12.971	1	4.8	0.020	0.128	0.108	5.32
A	10.946	2	4.1	0.020	0.123	0.103	5.12
A	11.045	2	4.3	0.019	0.122	0.103	5.27
A	11.045	2	4.2	0.020	0.122	0.103	5.17
A	11.048	2	4.2	0.020	0.123	0.103	5.15
A	11.047	2	4.3	0.020	0.123	0.103	5.30
A	11.077	2	4.5	0.019	0.124	0.105	5.54
A	13.022	2	4.0	0.023	0.137	0.114	4.95
A	13.007	2	4.2	0.022	0.136	0.114	5.17
A	13.012	2	4.1	0.023	0.136	0.113	5.01
A	12.996	2	4.3	0.022	0.137	0.115	5.31
A	12.994	2	4.2	0.022	0.135	0.113	5.11
A	13.016	2	4.1	0.022	0.135	0.113	5.01
B	11.019	2	5.7	0.016	0.126	0.110	6.83
B	11.017	2	5.8	0.016	0.126	0.110	6.84

B	10.999	2	6.0	0.016	0.126	0.111	7.09
B	11.013	2	5.8	0.016	0.126	0.110	6.92
B	11.001	2	5.8	0.016	0.125	0.109	6.84
B	10.983	2	6.1	0.015	0.126	0.111	7.23
B	13.018	2	5.4	0.019	0.137	0.119	6.36
B	13.015	2	5.1	0.020	0.138	0.119	6.09
B	13.022	2	5.2	0.019	0.137	0.118	6.11
B	13.017	2	5.0	0.020	0.139	0.119	6.00
B	13.007	2	5.1	0.019	0.138	0.118	6.12
B	12.994	2	5.0	0.020	0.138	0.118	5.95

Disipadores con superficies lisas (A y B)

En la Tabla 24 se observa la altura del resalto en los disipadores A y B, de superficies lisas. El disipador B alcanza la máxima altura (0.119 m) en pendiente 2%, la altura va en aumento en relación con la pendiente.

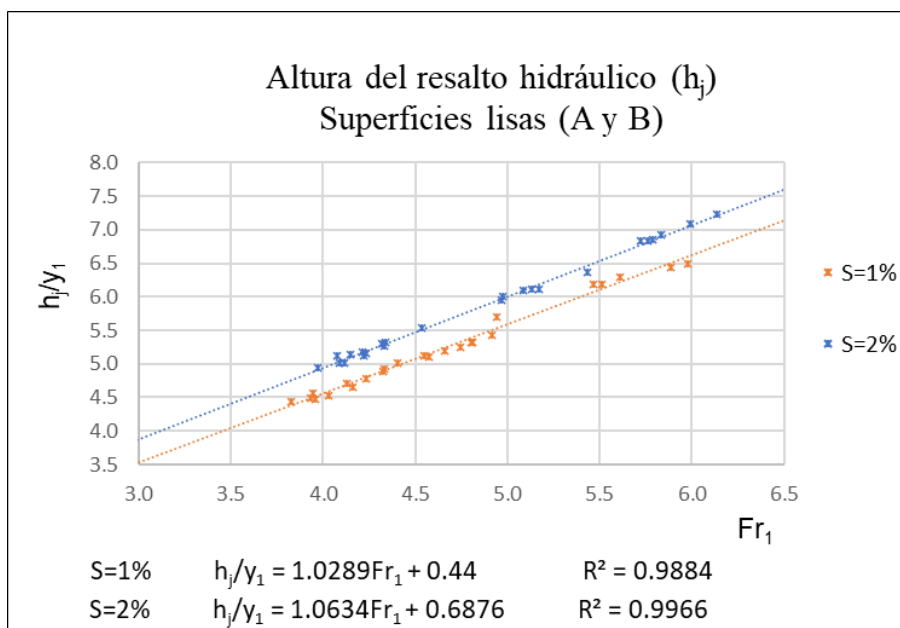


Figura 61: Altura del resalto hidráulico (A y B)

En la Figura 61 se tiene la altura del resalto para los disipadores A y B en dos pendientes, se observa que existe una alta relación entre la línea de tendencia y los valores experimentales en los disipadores de superficies lisas.

Se observa también que existe una relación positiva entre la altura y el número de Froude, además cuando el número de Froude, el caudal y la pendiente se incrementan alcanzan las máximas alturas.

Tabla 25: Altura del resalto hidráulico (C y D)

Disipador	Caudal	Pendiente	Nº Froude	Tirante Conjugado	Altura
-----------	--------	-----------	-----------	-------------------	--------

	Q	S	Fr ₁	C. Menor		C. Mayor	
				y ₁	y ₂	h _j	h _j /y ₁
C	11.015	1	3.3	0.023	0.088	0.064	2.78
C	11.000	1	3.0	0.025	0.086	0.061	2.48
C	11.015	1	3.4	0.023	0.083	0.060	2.63
C	11.010	1	3.3	0.023	0.084	0.061	2.61
C	11.018	1	3.3	0.023	0.085	0.062	2.67
C	11.013	1	3.0	0.025	0.084	0.059	2.35
C	13.020	1	3.1	0.027	0.097	0.070	2.57
C	13.025	1	3.0	0.028	0.096	0.069	2.48
C	13.005	1	3.2	0.027	0.097	0.071	2.67
C	13.017	1	3.1	0.027	0.097	0.070	2.56
C	13.027	1	2.9	0.028	0.098	0.069	2.45
C	13.030	1	3.3	0.026	0.097	0.071	2.73
D	11.015	1	5.9	0.016	0.086	0.070	4.44
D	11.003	1	5.1	0.018	0.086	0.068	3.90
D	11.006	1	6.1	0.015	0.089	0.074	4.76
D	11.019	1	6.1	0.015	0.090	0.074	4.79
D	11.003	1	5.8	0.016	0.089	0.073	4.61
D	11.016	1	6.3	0.015	0.087	0.072	4.74
D	12.997	1	5.4	0.019	0.099	0.080	4.31
D	13.005	1	5.8	0.018	0.097	0.079	4.40
D	13.010	1	5.6	0.018	0.097	0.079	4.30
D	13.012	1	5.5	0.019	0.099	0.080	4.33
D	12.995	1	6.0	0.017	0.098	0.081	4.64
D	13.001	1	6.2	0.017	0.098	0.081	4.74
C	12.995	2	3.5	0.025	0.104	0.079	3.14
C	13.020	2	3.4	0.026	0.104	0.079	3.07
C	13.000	2	3.4	0.026	0.104	0.078	3.05
C	13.038	2	3.7	0.024	0.103	0.078	3.22
C	13.021	2	3.1	0.027	0.104	0.077	2.85
C	12.998	2	3.6	0.025	0.102	0.078	3.17
D	10.995	2	6.1	0.015	0.093	0.077	5.00
D	11.017	2	6.2	0.015	0.091	0.076	4.95
D	11.025	2	6.2	0.015	0.092	0.077	5.03
D	11.005	2	6.4	0.015	0.093	0.078	5.21
D	11.030	2	6.1	0.015	0.091	0.076	4.92
D	11.007	2	6.2	0.015	0.094	0.079	5.11
D	13.015	2	5.2	0.019	0.113	0.094	4.85
D	12.995	2	5.2	0.019	0.111	0.091	4.77
D	13.007	2	5.0	0.020	0.112	0.092	4.70
D	12.980	2	5.2	0.019	0.112	0.093	4.86
D	12.980	2	5.2	0.019	0.110	0.091	4.73
D	12.997	2	5.0	0.020	0.109	0.090	4.54

Disipadores con superficies con fricción (C y D)

En la Tabla 25 se observa los valores experimentales de los disipadores C y D, la altura del resalto aumenta con el caudal y con la pendiente, existe una relación positiva en ambos tipos de disipadores. La máxima altura corresponde al disipador D, con 13 l/s y pendiente 2%.

Se observa también que la altura aumenta cuando se incrementa el número de Froude, existe una relación positiva.

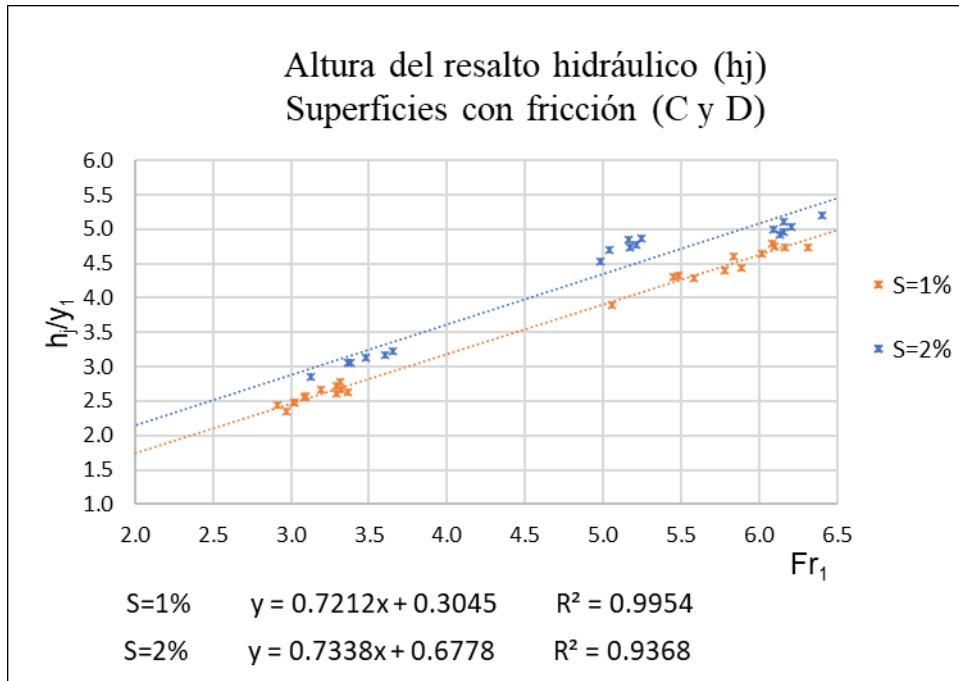


Figura 62: Altura del resalto hidráulico (C y D)

En la Figura 62 se observa una fuerte correlación de la curva característica de la Altura Relativa con los resultados experimentales. Aunque se observa mayor dispersión en la pendiente 2%, sin embargo, existe una alta relación de los datos ($R^2 = 0.9368$). En pendiente 1% existe una alta relación positiva de la línea con los valores experimentales ($R^2 = 0.9954$). El disipador C se ajusta mejor a la línea de tendencia que el disipador D.

4.6.4 Pérdida de Energía

En este acápite se analizará si existe discrepancias en la pérdida de energía debido a la pendiente. En canal horizontal se obtuvo dos tendencias bien definidas de los datos, con una alta correlación ($R^2 = 0.9978$) para superficies lisas y ($R^2 = 0.9915$) tomando en consideración el efecto de la fricción. Según Montoya *et.al.* (1999) las hipótesis asumidas para el análisis de la pérdida de energía con fricción consideran coeficientes de Coriolis $\alpha = 1.0$ y de Boussinesq $\beta = 1.0$, en canal rectangular y de baja pendiente.

Tabla 26: Pérdida de energía con pendiente variable (A y B)

Disipador	Caudal	Pendiente	N° Froude	Pérdida de energía	Energía específica	Pérdida relativa
A	11.035	1	4.5	0.09	0.21	0.43
A	11.045	1	4.3	0.08	0.20	0.40
A	11.038	1	4.3	0.08	0.20	0.41
A	11.047	1	4.2	0.08	0.20	0.39
A	11.008	1	4.1	0.07	0.19	0.37
A	10.960	1	4.4	0.08	0.20	0.41
A	13.021	1	3.8	0.06	0.20	0.32
A	13.038	1	4.2	0.08	0.22	0.39
A	13.019	1	4.0	0.07	0.20	0.35
A	12.990	1	3.9	0.07	0.20	0.34
A	13.020	1	4.0	0.08	0.21	0.37
A	12.995	1	3.9	0.07	0.20	0.34
B	11.001	1	5.5	0.14	0.26	0.53
B	10.990	1	4.9	0.11	0.23	0.47
B	10.995	1	5.9	0.17	0.29	0.58
B	11.013	1	5.6	0.15	0.27	0.55
B	11.002	1	5.5	0.14	0.27	0.54
B	11.026	1	6.0	0.17	0.30	0.59
B	13.001	1	4.6	0.11	0.24	0.44
B	13.017	1	4.7	0.11	0.25	0.45
B	12.993	1	4.9	0.13	0.26	0.49
B	13.001	1	4.7	0.12	0.25	0.47
B	12.997	1	4.8	0.12	0.25	0.47
B	12.971	1	4.8	0.12	0.25	0.47
A	10.946	2	4.1	0.06	0.19	0.32
A	11.045	2	4.3	0.08	0.20	0.37
A	11.045	2	4.2	0.07	0.20	0.35
A	11.048	2	4.2	0.06	0.19	0.34
A	11.047	2	4.3	0.07	0.20	0.37
A	11.077	2	4.5	0.09	0.21	0.40
A	13.022	2	4.0	0.06	0.20	0.30
A	13.007	2	4.2	0.08	0.22	0.36
A	13.012	2	4.1	0.07	0.21	0.33
A	12.996	2	4.3	0.08	0.23	0.37
A	12.994	2	4.2	0.08	0.22	0.36
A	13.016	2	4.1	0.07	0.21	0.34
B	11.019	2	5.7	0.15	0.28	0.53
B	11.017	2	5.8	0.15	0.28	0.54
B	10.999	2	6.0	0.17	0.30	0.56
B	11.013	2	5.8	0.16	0.29	0.55
B	11.001	2	5.8	0.15	0.28	0.54

B	10.983	2	6.1	0.17	0.30	0.57
B	13.018	2	5.4	0.15	0.29	0.52
B	13.015	2	5.1	0.13	0.27	0.47
B	13.022	2	5.2	0.14	0.28	0.49
B	13.017	2	5.0	0.12	0.26	0.46
B	13.007	2	5.1	0.13	0.27	0.48
B	12.994	2	5.0	0.12	0.26	0.46

$\Delta E_f/E_1$ es la pérdida relativa de energía con fricción
Los disipadores A y B son de superficie lisa.

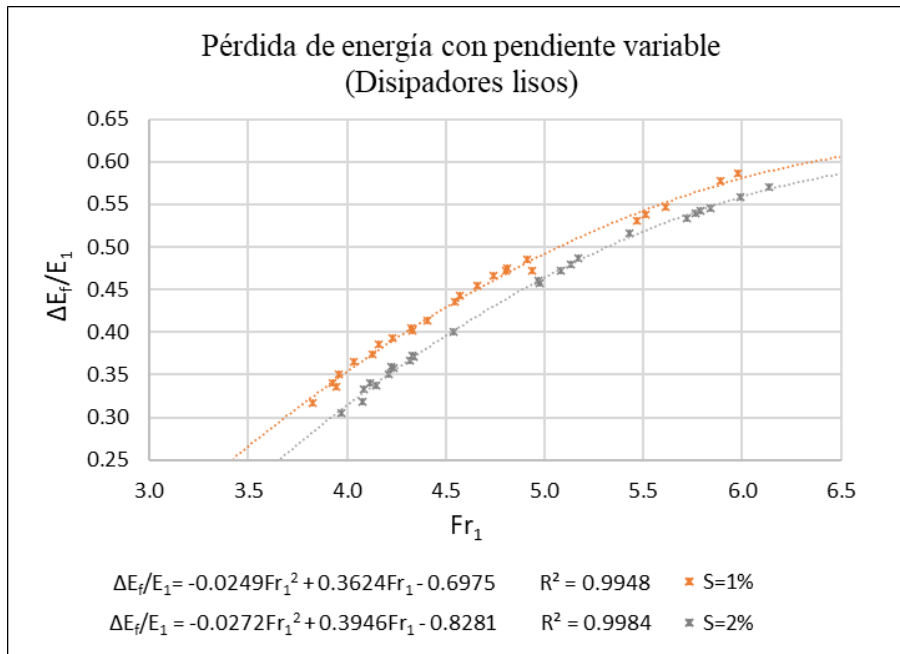


Figura 63: Pérdida de energía en superficie lisa con pendiente variable

En la Figura 63 se observa que existe una alta relación positiva entre las curvas y los valores experimentales, cuando el número de Froude aumenta, las pérdidas de energía también tienden a aumentar, sin embargo, cada pendiente presenta un comportamiento diferente, dado que los valores experimentales no están relacionados entre ellos.

Tabla 27: Pérdida de energía con pendiente variable (C y D)

Disipador	Caudal	Pendiente	Nº Froude	Pérdida de energía	Energía específica	Pérdida relativa
	Q (l/s)	S ₀ (%)	Fr ₁	ΔE _f	E ₁ (m)	ΔE _f /E ₁
C	11.015	1	3.3	0.05	0.15	0.36
C	11.000	1	3.0	0.04	0.14	0.31
C	11.015	1	3.4	0.06	0.15	0.39
C	11.010	1	3.3	0.06	0.15	0.37
C	11.018	1	3.3	0.06	0.15	0.37
C	11.013	1	3.0	0.04	0.14	0.31

C	13.020	1	3.1	0.05	0.16	0.32
C	13.025	1	3.0	0.05	0.15	0.31
C	13.005	1	3.2	0.05	0.16	0.34
C	13.017	1	3.1	0.05	0.16	0.32
C	13.027	1	2.9	0.04	0.15	0.27
C	13.030	1	3.3	0.06	0.17	0.36
D	11.015	1	5.9	0.19	0.29	0.67
D	11.003	1	5.1	0.15	0.24	0.61
D	11.006	1	6.1	0.21	0.30	0.68
D	11.019	1	6.1	0.20	0.30	0.67
D	11.003	1	5.8	0.19	0.29	0.66
D	11.016	1	6.3	0.22	0.32	0.70
D	12.997	1	5.4	0.19	0.29	0.63
D	13.005	1	5.8	0.21	0.32	0.66
D	13.010	1	5.6	0.20	0.30	0.65
D	13.012	1	5.5	0.19	0.30	0.63
D	12.995	1	6.0	0.22	0.33	0.67
D	13.001	1	6.2	0.23	0.34	0.68
C	12.995	2	3.5	0.06	0.18	0.36
C	13.020	2	3.4	0.06	0.17	0.34
C	13.000	2	3.4	0.06	0.17	0.34
C	13.038	2	3.7	0.07	0.19	0.40
C	13.021	2	3.1	0.05	0.16	0.29
C	12.998	2	3.6	0.07	0.18	0.39
D	10.995	2	6.1	0.20	0.30	0.67
D	11.017	2	6.2	0.21	0.31	0.68
D	11.025	2	6.2	0.21	0.31	0.68
D	11.005	2	6.4	0.22	0.32	0.69
D	11.030	2	6.1	0.21	0.31	0.67
D	11.007	2	6.2	0.20	0.31	0.67
D	13.015	2	5.2	0.16	0.28	0.56
D	12.995	2	5.2	0.16	0.28	0.58
D	13.007	2	5.0	0.15	0.27	0.55
D	12.980	2	5.2	0.16	0.28	0.58
D	12.980	2	5.2	0.16	0.28	0.57
D	12.997	2	5.0	0.15	0.26	0.56

Los disipadores C y D son de superficies con fricción.

En la Tabla 27 se observa que en cada pendiente las pérdidas de energía en el disipador C son menores cuando el número de Froude disminuyen, las pérdidas de energía son mayores en canal horizontal y en el disipador D las pérdidas de energía son mayores cuando se incrementa el número de Froude.

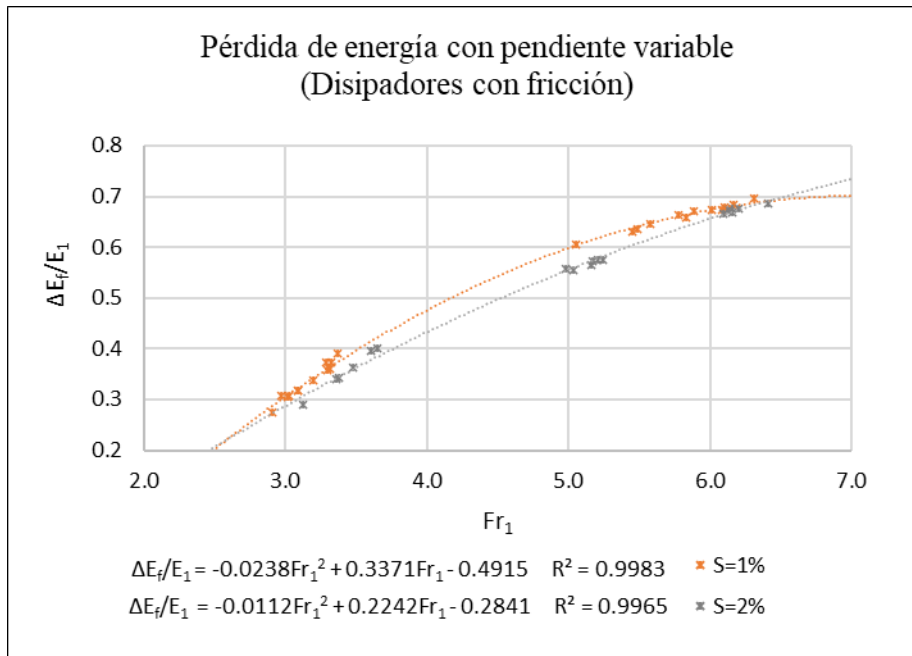


Figura 64: Pérdida de energía en superficie con fricción con pendiente variable

En la Figura 64 se observa una alta relación positiva entre las curvas y los valores experimentales en cada pendiente, las pérdidas de energía son mayores cuando se incrementa los valores del número de Froude. A diferencia de los disipadores lisos, en los disipadores con fricción no existen diferencias significativas entre las pendientes 1% y 2% cuando el número de Froude supera el 6.0.

4.6.5 Disipación de Energía

La disipación de energía es la pérdida relativa de energía con fricción ($\Delta E_f/E_1$) expresada en porcentaje (%), se calcula con la ecuación (38), donde $\Delta E_f = E_1 - E_2$.

$$\%Disipación = \frac{E_1 - E_2}{E_1} 100$$

Tabla 28: Disipación de energía en pendiente (A y B)

Disipador	Caudal	Pendiente S	N° Froude	ΔE_f	E_1	$\Delta E_f/E_1 * 100$
	Q		Fr_1			
	(l/s)	(%)			(m)	(%)
A	11.035	1	4.5	0.09	0.21	43.5
A	11.045	1	4.3	0.08	0.20	40.3
A	11.038	1	4.3	0.08	0.20	40.5
A	11.047	1	4.2	0.08	0.20	39.3
A	11.008	1	4.1	0.07	0.19	37.3
A	10.960	1	4.4	0.08	0.20	41.3

A	13.021	1	3.8	0.06	0.20	31.7
A	13.038	1	4.2	0.08	0.22	38.6
A	13.019	1	4.0	0.07	0.20	35.1
A	12.990	1	3.9	0.07	0.20	33.6
A	13.020	1	4.0	0.08	0.21	36.5
A	12.995	1	3.9	0.07	0.20	34.1
B	11.001	1	5.5	0.14	0.26	53.1
B	10.990	1	4.9	0.11	0.23	47.2
B	10.995	1	5.9	0.17	0.29	57.8
B	11.013	1	5.6	0.15	0.27	54.7
B	11.002	1	5.5	0.14	0.27	53.8
B	11.026	1	6.0	0.17	0.30	58.7
B	13.001	1	4.6	0.11	0.24	44.3
B	13.017	1	4.7	0.11	0.25	45.4
B	12.993	1	4.9	0.13	0.26	48.6
B	13.001	1	4.7	0.12	0.25	46.6
B	12.997	1	4.8	0.12	0.25	47.4
B	12.971	1	4.8	0.12	0.25	47.2
A	10.946	2	4.1	0.06	0.19	31.9
A	11.045	2	4.3	0.08	0.20	37.2
A	11.045	2	4.2	0.07	0.20	35.1
A	11.048	2	4.2	0.06	0.19	33.7
A	11.047	2	4.3	0.07	0.20	36.7
A	11.077	2	4.5	0.09	0.21	40.0
A	13.022	2	4.0	0.06	0.20	30.5
A	13.007	2	4.2	0.08	0.22	35.8
A	13.012	2	4.1	0.07	0.21	33.3
A	12.996	2	4.3	0.08	0.23	37.1
A	12.994	2	4.2	0.08	0.22	35.9
A	13.016	2	4.1	0.07	0.21	34.0
B	11.019	2	5.7	0.15	0.28	53.4
B	11.017	2	5.8	0.15	0.28	53.9
B	10.999	2	6.0	0.17	0.30	55.9
B	11.013	2	5.8	0.16	0.29	54.6
B	11.001	2	5.8	0.15	0.28	54.3
B	10.983	2	6.1	0.17	0.30	57.1
B	13.018	2	5.4	0.15	0.29	51.5
B	13.015	2	5.1	0.13	0.27	47.2
B	13.022	2	5.2	0.14	0.28	48.7
B	13.017	2	5.0	0.12	0.26	45.7
B	13.007	2	5.1	0.13	0.27	48.0
B	12.994	2	5.0	0.12	0.26	46.0

Los disipadores A y B son considerados de superficie lisa.

En la Tabla 28 se observa que la mayor energía disipada se halla en el disipador B. Existe una relación positiva entre los valores experimentales del número de Froude y la disipación de energía, esta disipación crece cuando la pendiente aumenta.

Duarte (2011) señala que los resaltos hidráulicos se clasifican según la magnitud del número de Froude del flujo y a la vez está relacionada con la disipación de energía. Para $4.5 < Fr_1 < 9.0$ la disipación de energía estaría entre 45% y 70%. Se observa en la tabla que en canal horizontal se cumple el porcentaje de disipación de energía.

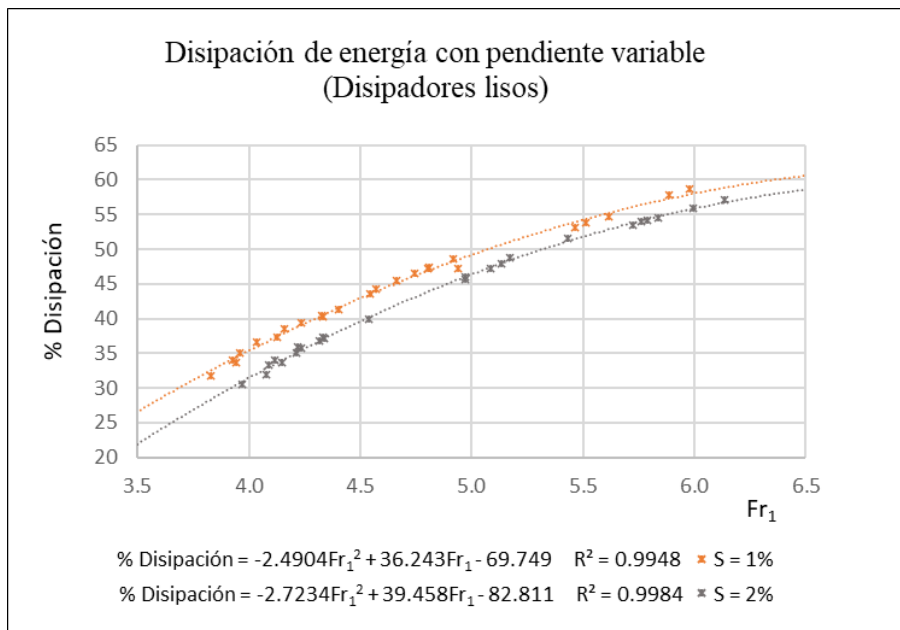


Figura 65: Disipación de energía en disipadores lisos en pendiente variable

En la Figura 65 existe una alta relación positiva en cada pendiente entre la curva con los valores de porcentaje de disipación de energía. Los valores máximos de disipación se encuentran en pendiente 1%, puede existir una misma disipación entre pendientes, pero con diferentes valores del número de Froude.

Tabla 29: Disipación de energía en pendiente (C y D)

Disipador	Caudal Q (l/s)	Pendiente S (%)	Nº	ΔE_f (m)	E_1 (m)	$\Delta E_f/E_1 * 100$ (%)
			Froude Fr_1			
C	11.015	1	3.3	0.05	0.15	36.0
C	11.000	1	3.0	0.04	0.14	30.7
C	11.015	1	3.4	0.06	0.15	39.1
C	11.010	1	3.3	0.06	0.15	37.2
C	11.018	1	3.3	0.06	0.15	37.4
C	11.013	1	3.0	0.04	0.14	30.8
C	13.020	1	3.1	0.05	0.16	31.8
C	13.025	1	3.0	0.05	0.15	30.5
C	13.005	1	3.2	0.05	0.16	33.7
C	13.017	1	3.1	0.05	0.16	31.8
C	13.027	1	2.9	0.04	0.15	27.4

C	13.030	1	3.3	0.06	0.17	35.9
D	11.015	1	5.9	0.19	0.29	67.1
D	11.003	1	5.1	0.15	0.24	60.5
D	11.006	1	6.1	0.21	0.30	67.8
D	11.019	1	6.1	0.20	0.30	67.5
D	11.003	1	5.8	0.19	0.29	65.9
D	11.016	1	6.3	0.22	0.32	69.7
D	12.997	1	5.4	0.19	0.29	63.1
D	13.005	1	5.8	0.21	0.32	66.3
D	13.010	1	5.6	0.20	0.30	64.7
D	13.012	1	5.5	0.19	0.30	63.5
D	12.995	1	6.0	0.22	0.33	67.5
D	13.001	1	6.2	0.23	0.34	68.4
C	12.995	2	3.5	0.06	0.18	36.3
C	13.020	2	3.4	0.06	0.17	34.2
C	13.000	2	3.4	0.06	0.17	33.9
C	13.038	2	3.7	0.07	0.19	40.1
C	13.021	2	3.1	0.05	0.16	28.9
C	12.998	2	3.6	0.07	0.18	39.5
D	10.995	2	6.1	0.20	0.30	66.7
D	11.017	2	6.2	0.21	0.31	67.5
D	11.025	2	6.2	0.21	0.31	67.6
D	11.005	2	6.4	0.22	0.32	68.7
D	11.030	2	6.1	0.21	0.31	67.4
D	11.007	2	6.2	0.20	0.31	66.8
D	13.015	2	5.2	0.16	0.28	56.5
D	12.995	2	5.2	0.16	0.28	57.6
D	13.007	2	5.0	0.15	0.27	55.5
D	12.980	2	5.2	0.16	0.28	57.5
D	12.980	2	5.2	0.16	0.28	57.2
D	12.997	2	5.0	0.15	0.26	55.7

En la Tabla 29 se observa la relación positiva entre el número de Froude y la energía disipada. El dissipador D alcanza el máximo porcentaje de disipación. Según la clasificación de resaltos hidráulicos un resalto oscilante se halla en el rango de $2.5 < Fr_1 < 4.5$ y el porcentaje de disipación para esos rangos son menores a 45%, y para $4.5 < Fr_1 < 9.0$ la disipación de energía estaría entre 45% y 70%. Asimismo, se observa en la tabla que en pendiente variable se cumple también el rango de la disipación formulada.

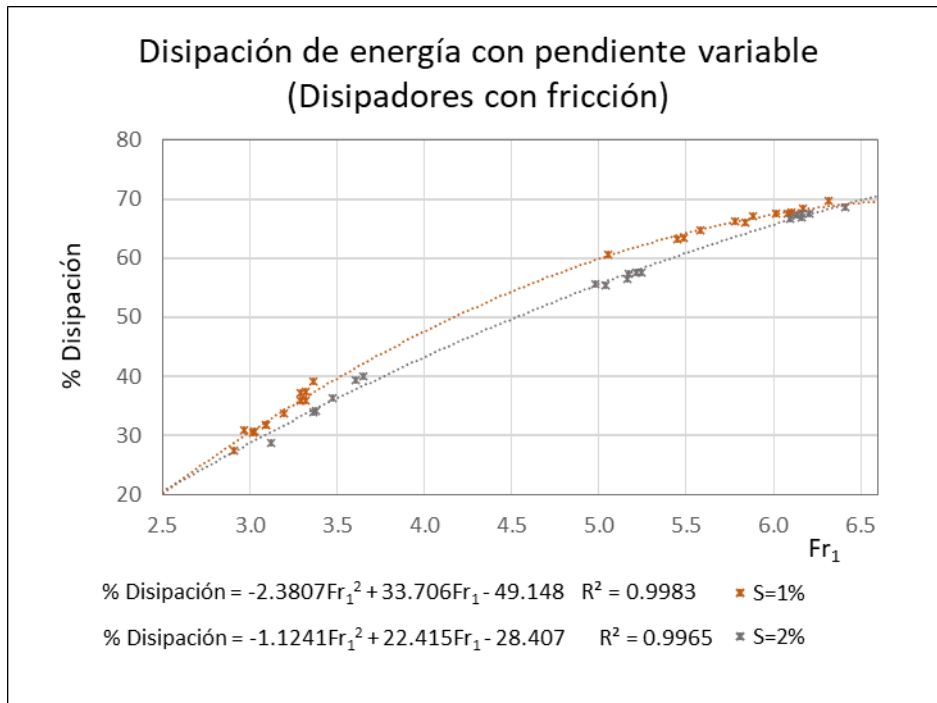


Figura 66: Disipación de energía en disipadores con obstáculo en pendiente variable

En la Figura 66 se observa que existe una alta relación de las curvas con la energía disipada, la cual se incrementa cuando el número de Froude crece. Se observa además en esta figura, que en valores máximos del número de Froude la disipación de energía con pendiente es más efectiva, mientras que la disipación de energía es mejor en pendiente 1% para valores de número de Froude menores a seis.

4.6.6 Eficiencia del resalto hidráulico

En este acápite se ha unificado todas las variables para un mayor análisis del resalto hidráulico, la eficiencia se calcula con la ecuación (35). Cabe resaltar que se ha aplicado el principio de *momentum* adicionando la componente del *momentum* lineal debido a la fricción que ejerce las paredes y el fondo del canal, y no la ecuación de la conservación de la energía, el análisis de la eficiencia del resalto (E_2/E_1) se ha efectuado en cada pendiente y separados por disipadores lisos (A y B) y con fricción (C y D).

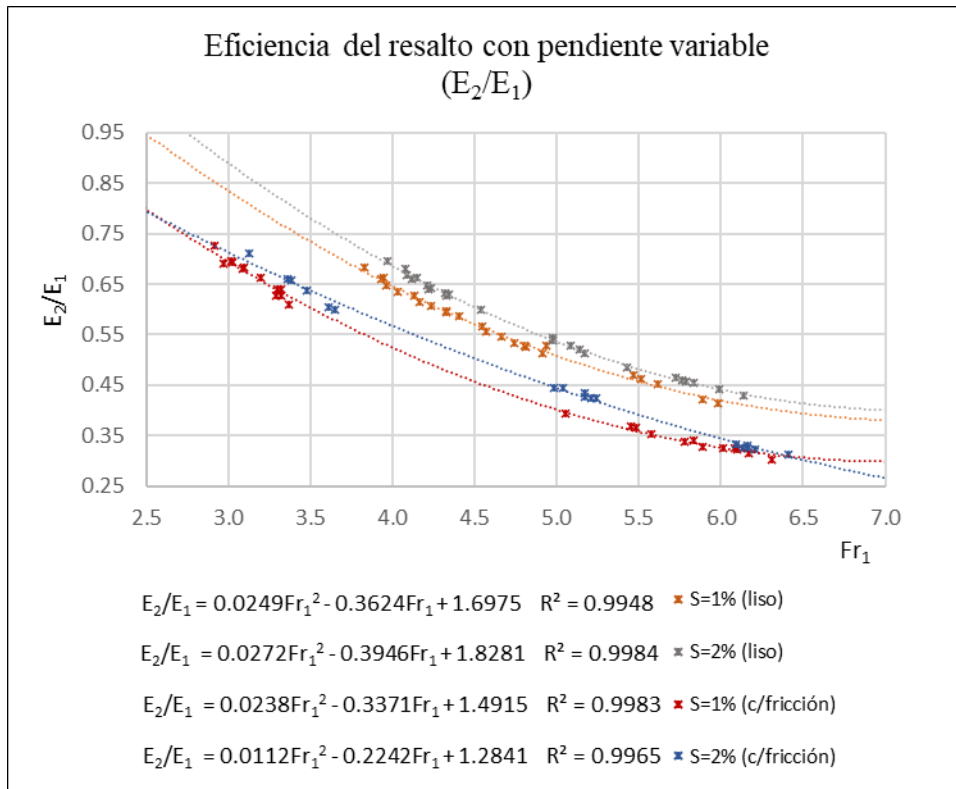


Figura 67: Eficiencia del resalto hidráulico con obstáculo en pendiente variable

En la Figura 67 se muestra la eficiencia del resalto hidráulico en los cuatro disipadores considerando la fricción y la pendiente. Se observan cuatro curvas que tienen alta relación negativa con los resultados obtenidos. La eficiencia depende del número de Froude ($R^2 > 0.99$) y se incrementa cuando el número de Froude decrece, no obstante, cuando se comparan los valores experimentales de los disipadores con fricción (C y D) se observa que pueden alcanzar la misma eficiencia que un disipador liso (A y B) con valores menores del número de Froude. La mayor eficiencia lo tiene el disipador con fricción en pendiente 1% y en el valor mínimo del número de Froude, en este caso el disipador C con eficiencia de 0.73.

VI. CONCLUSIONES

1. Las características del flujo en los cuatro disipadores de energía en canal horizontal presentan perfecta concordancia en la familia de curvas características del resalto hidráulico y demuestra la validez del principio de *momentum* y la ecuación de continuidad en el resalto hidráulico. Se comprobó además la aplicabilidad del Número de Froude en la investigación cumpliendo con los objetivos del presente trabajo de tesis.
2. Los resultados obtenidos de los niveles de los tirantes conjugados en relación con las pendientes en todos los casos demuestran que para un mismo Número de Froude del flujo entrante los valores experimentales en pendiente 2% son más altos en comparación con la pendiente 1%.
3. La clasificación de los disipadores de energía en dos grupos: superficie lisa y con fricción, resuelven las discrepancias del presente estudio sobre la disipación de energía en los disipadores con fricción, de manera que existe una disipación por fricción o llamado también disipación en el *momentum* lineal. En la investigación los resultados arrojaron que, la diferencia de la energía específica antes y después del resalto es igual a la ecuación del resalto agregando la componente adicional de la disipación por fricción, la cual se puede calcular.
4. En términos generales, la evaluación de las características del resalto hidráulico fue satisfactoria en cada disipador (A, B, C, D) y en cada pendiente (0, 1%, 2%). Los tirantes conjugados, la altura, la longitud del resalto, la pérdida de energía, la disipación de energía y la eficiencia mostraron una alta correlación de datos, obteniendo mejores ajustes en los disipadores de superficies lisas, la mayor disipación se halló en el disipador de energía D (con fricción) en pendiente 1%.
5. La mayor eficiencia se alcanzó en caudal de 13 l/s en todos los casos. El disipador de energía C obtuvo el más alto coeficiente en pendientes 1% y 2% y luego en lecho horizontal el disipador de energía A.

VII. RECOMENDACIONES

Proseguir la investigación en el laboratorio con las siguientes recomendaciones:

1. Para la medición del tirante conjugado menor se recomienda la menor profundidad observada, debido a que el perfil del flujo al inicio del resalto es fluctuante.
2. Para la medición de la longitud del resalto hidráulico se debe tomar en cuenta la permanencia de las burbujas de aire y descartar las que se presentan de manera intermitente.
3. Para el dissipador C utilizar los caudales en el rango de $11 \text{ l/s} < Q < 15 \text{ l/s}$.
4. Tener en cuenta el impacto de la fricción en las paredes y el fondo del canal en flujos bajos y obligatoriamente cuando haya dissipadores de energía con bloques o gravas dentro del volumen de control; dependiendo del tipo de dissipador que se utilice se debe incorporar el factor de fricción obtenido en el estudio de investigación en la ecuación de energía.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Castillo, P. 2016. Estudio Experimental y Modelización Numérica de Flujo en Canal Horizontal sobre Vertedero Creager. (en línea) Tesis de Máster. Sevilla. España. Universidad de Sevilla. 128 p. Consultado 25 jun. 2019. Disponible en: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70774/fichero/Memoria_definitva.pdf
- Duarte, C. 2011. Introducción a la Hidráulica de Canales. Ediciones Mundi-Prensa. Bogotá Colombia. 242 p.
- Elnikhely, E.A. 2018. Investigation and analysis of scour downstream of a spillway. (en línea) Ain Shams Engineering Journal 9(2275-2282). Zagazig. Egypt. Consultado el 03 jul. 2019. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/317331057_Investigation_and_analysis_of_f_scour_downstream_of_a_spillway<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447917300631>
- IIT Kharagpur. 2008. Water Resources Engineering: Module 4 Hydraulic Structures for Flow Diversion and Storage. (en línea). India. 1200 p. Consultado 02 Jul 2019. Disponible en <https://nptel.ac.in/courses/105105110/32>
- Kumar, S; Mehta, R. 2010. Experimental Study of Hydraulic Jump Characteristics in Sloping Prismatic Channels. (en línea). ICTACEM 2010/0045. India. Consultado el 05 jul. 2019. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/236154641_Experimental_Study_of_Hydraulic_Jump_Characteristics_in_Sloping_Prismatic_Channels
- López, A. Manual de Hidráulica. 1997. (en línea) Alicante, España. 414 p. Consultado 18-07-2019. Disponible en: <http://eds.a.ebscohost.com/eds/ebookviewer/ebook/bmxlYmtfXzMxNzk2NI9fQU41?sid=9b6943a4-777a-a8d3-ba5e1512a98@pdc-v-sessmgr02&vid=1&format=EB>
- Montoya, L. Botero, L. Naranjo, J. 1999. Resaltos hidráulicos y disipación de energía. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Posgrado en Recursos Hidráulicos.
- <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9133>

- Ortiz, F. 2010. Modelo hidráulico físico de disipadores de energía, como ayuda de aprendizaje de la materia hidráulica. (en línea). Tesis de grado. Sangolquí. Ecuador. Escuela Politécnica del Ejército. 103 p. Consultado el 10-07-2019. Disponible en
- Pardo, R. 2018. Disipadores de energía – parte 1: el salto hidráulico (en línea). Ingeniería Hidráulica Ambiental 40(2):10-24. Consultado en línea 17 jun. 2019. Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/1727/1/T-ESPE-029264.pdf>.
- Peterka, A.J. 1978. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation. Ediciones Engineering Monographs. Washington, USA. 222 p.
- Ramírez, A. 2011. La seguridad de presas desde la perspectiva hidrológica. (en línea) Conferencia Enzo Levi. Tecnología y Ciencias del Agua. Morelos. México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2(2):157-173. Consultado 05-07-2019. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/3535/353531973010.pdf>
- Reyes, D; Roldán, O. 2018. Influencia de la Geometría hidrodinámica en la disipación de energía de cuatro vertederos tipo laberinto y un vertedero tipo rectangular con igual caudal de descarga y pendiente. (en línea) Tesis de grado. Trujillo, Perú. Universidad Privada Antenor Orrego. Consultado 10 jul 2019. Disponible en <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7707/1/CD-4353.pdf>
- Riyadh, Z; Khedher, I; Asaad, N. 2016. Energy Dissipation on the Ogee Spillways by Using Direction Diverting Blocks. (en línea). Journal of Engineering 22(3):77-88. Disponible en <https://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=107726>
- Rodríguez, P. (2008). Hidráulica II. (en línea). México. 570 p. Consultado el 10 jul. 2019. Disponible en:
- https://carlosquispeanccasi.files.wordpress.com/2011/12/hidraulica_ruiz.pdf
- Rodríguez, P. (2017). Longitud del Salto Hidráulico: Modelación Física, Numérica y Ecuaciones Semiempíricas. (en línea) XXIV Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco. Guerrero. México. Consultado 03 jul 2019. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/330535413_Longitud del salto hidráulico modelación física numérica y ecuaciones semiempíricas.](https://www.researchgate.net/publication/330535413_Longitud_del_salto_hidraulico_modelacion_fisica_numerica_y_ecuaciones_semiempiricas)
- Sánchez, D. (2012). Determinación de la distribución de velocidades en un cuenco de disipación de energía de un vertedero de caída libre. (en línea). Proyecto fin de

carrera. 261 p. Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia. Consultado el 10 jul. 2019. Disponible en:

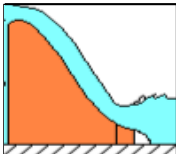
https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis_pfc/PFC_Daniel_Sanchez_2012.pdf

- Villamarín, S. 2013. Manual básico de diseño de estructuras de disipación de energía hidráulica. (en línea). Tesis de grado. Sangolquí, Ecuador. Escuela Politécnica del Ejército. p 22. Consultado el 01 jul. 2019. Disponible en:
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6181/1/T-ESPE-040211.pdf>
- Zare, M; Shirvani, M. 2016. Comparing hydraulic jump in ogee spillways with different slopes. (en línea). IIOAB Journal 7(1):83-85. Consultado 20 jun. 2019
Disponible en https://www.iioab.org/articles/IIOABJ_7.S1_83-85.pdf

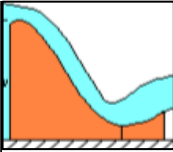
IX ANEXOS

Anexo I: Análisis de dispersión

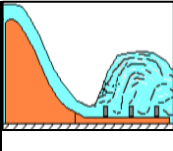
Disipador A, S = 0

	S = 0	Q = 11 l/s		Q = 13 l/s	
		Tirante conjugado		Tirante conjugado	
		C. menor	C. mayor	C. menor	C. mayor
N° réplicas	y_1	y_2	y_1	y_2	
	(m)	(m)	(m)	(m)	
DISIPADOR A	1	0.0201	0.1083	0.0241	0.1204
	2	0.0195	0.1066	0.0243	0.1198
	3	0.0201	0.1081	0.0240	0.1182
	4	0.0201	0.1065	0.0235	0.1185
	5	0.0201	0.1068	0.0247	0.1203
	6	0.0201	0.1079	0.0245	0.1182
Media	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	0.0200	0.1074	0.0242	0.1192
Desviación estándar	$S_y = \sqrt{\frac{(y_i - m)^2}{N - 1}}$	0.0003	0.0008	0.0004	0.0011
Incertidumbre	$E_y = \frac{S_y}{\sqrt{N}}$	± 0.0001	± 0.0003	± 0.0002	± 0.0004
Error porcentual	$\%E = \frac{E_y}{\bar{y}}$	± 0.5 %	± 0.3 %	± 0.7 %	± 0.4 %

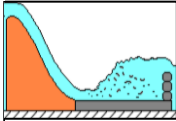
Disipador B, S = 0

	S = 0	Q = 11 l/s		Q = 13 l/s	
		Tirante conjugado		Tirante conjugado	
		C. menor	C. mayor	C. menor	C. mayor
N° réplicas		y₁	y₂	y₁	y₂
		(m)	(m)	(m)	(m)
DISIPADOR B	1	0.0182	0.1082	0.0210	0.1203
	2	0.0177	0.1087	0.0205	0.1214
	3	0.0181	0.1083	0.0217	0.1207
	4	0.0178	0.1088	0.0213	0.1205
	5	0.0176	0.1074	0.0199	0.1205
	6	0.0181	0.1086	0.0214	0.1194
Media	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	0.0179	0.1083	0.0210	0.1205
Desviación estándar	$S_y = \sqrt{\frac{(y_i - m)^2}{N - 1}}$	0.0002	0.0005	0.0007	0.0006
Incertidumbre	$E_y = \frac{S_y}{\sqrt{N}}$	± 0.0001	± 0.0002	± 0.0003	± 0.0003
Error porcentual	$\%E = \frac{E_y}{\bar{y}}$	± 0.5 %	± 0.2 %	± 1 %	± 0.2 %

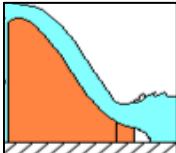
Disipador C, S = 0

	S = 0	Q = 11 l/s		Q = 13 l/s	
		Tirante conjugado		Tirante conjugado	
		C. menor	C. mayor	C. menor	C. mayor
N° réplicas		y₁	y₂	y₁	y₂
		(m)	(m)	(m)	(m)
DISIPADOR C	1	0.0250	0.0727	0.0262	0.0817
	2	0.0233	0.0755	0.0248	0.0797
	3	0.0231	0.0729	0.0249	0.0788
	4	0.0242	0.0728	0.0270	0.0801
	5	0.0222	0.0729	0.0248	0.0808
	6	0.0211	0.0728	0.0258	0.0811
Media	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	0.0232	0.0733	0.0256	0.0804
Desviación estándar	$S_y = \sqrt{\frac{(y_i - m)^2}{N - 1}}$	0.0014	0.0011	0.0009	0.0010
Incertidumbre	$E_y = \frac{S_y}{\sqrt{N}}$	± 0.0006	± 0.0005	± 0.0004	± 0.0004
Error porcentual	$\%E = \frac{E_y}{\bar{y}}$	± 2 %	± 0.6 %	± 1.5 %	± 0.5 %

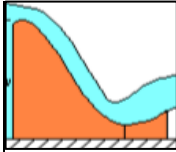
Disipador D, S = 0

	S = 0	Q = 11 l/s		Q = 13 l/s	
		Tirante conjugado			
		C. menor	C. mayor	C. menor	C. mayor
N° réplicas	y_1	y_2	y_1	y_2	
	(m)	(m)	(m)	(m)	
DISIPADOR D	1	0.0174	0.0827	0.0184	0.0963
	2	0.0165	0.0837	0.0195	0.0963
	3	0.0160	0.0829	0.0193	0.0967
	4	0.0167	0.0840	0.0191	0.0972
	5	0.0164	0.0830	0.0195	0.0969
	6	0.0158	0.0840	0.0195	0.0952
Media	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	0.0165	0.0834	0.0192	0.0964
Desviación estándar	$S_y = \sqrt{\frac{(y_i - m)^2}{N - 1}}$	0.0006	0.0006	0.0004	0.0007
Incertidumbre	$E_y = \frac{S_y}{\sqrt{N}}$	± 0.0002	± 0.0002	± 0.0002	± 0.0003
Error porcentual	$\%E = \frac{E_y}{\bar{y}}$	± 1.4 %	± 0.3 %	± 0.9 %	± 0.3 %

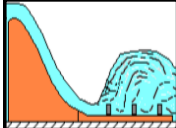
Disipador A, S = 0.01

	S = 1	Q = 11 l/s		Q = 13 l/s	
		Tirante conjugado			
		C. menor	C. mayor	C. menor	C. mayor
N° réplicas	y_1	y_2	y_1	y_2	
	(m)	(m)	(m)	(m)	
DISIPADOR A	1	0.0188	0.1154	0.0236	0.1282
	2	0.0195	0.1154	0.0223	0.1264
	3	0.0195	0.1147	0.0231	0.1260
	4	0.0198	0.1141	0.0231	0.1286
	5	0.0200	0.1144	0.0228	0.1259
	6	0.0191	0.1150	0.0231	0.1271
Media	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	0.0194	0.1148	0.0230	0.1270
Desviación estándar	$S_y = \sqrt{\frac{(y_i - m)^2}{N - 1}}$	0.0004	0.0005	0.0004	0.0011
Incertidumbre	$E_y = \frac{S_y}{\sqrt{N}}$	± 0.0002	± 0.0002	± 0.0002	± 0.0005
Error porcentual	$\%E = \frac{E_y}{\bar{y}}$	± 0.9 %	± 0.2 %	± 0.8 %	± 0.4 %

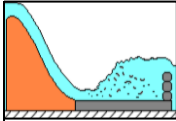
Disipador B, S = 0.01

	S = 1	Q = 11 l/s		Q = 13 l/s	
		Tirante conjugado			
		C. menor	C. mayor	C. menor	C. mayor
N° réplicas		y₁	y₂	y₁	y₂
		(m)	(m)	(m)	(m)
DISIPADOR B	1	0.0166	0.1194	0.0209	0.1277
	2	0.0178	0.1189	0.0207	0.1280
	3	0.0158	0.1175	0.0199	0.1282
	4	0.0163	0.1193	0.0204	0.1276
	5	0.0165	0.1189	0.0202	0.1278
	6	0.0157	0.1173	0.0202	0.1278
Media	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	0.0165	0.1185	0.0204	0.1278
Desviación estándar	$S_y = \sqrt{\frac{(y_i - m)^2}{N - 1}}$	0.0007	0.0009	0.0004	0.0002
Incertidumbre	$E_y = \frac{S_y}{\sqrt{N}}$	± 0.0003	± 0.0004	± 0.0001	± 0.0001
Error porcentual	$\%E = \frac{E_y}{\bar{y}}$	± 1.9 %	± 0.3 %	± 0.7 %	± 0.1 %


Disipador C, S = 0.01

	S = 1	Q = 11 l/s		Q = 13 l/s	
		Tirante conjugado			
		C. menor	C. mayor	C. menor	C. mayor
N° réplicas		y₁	y₂	y₁	y₂
		(m)	(m)	(m)	(m)
DISIPADOR C	1	0.0232	0.0877	0.0272	0.0969
	2	0.0247	0.0858	0.0276	0.0962
	3	0.0230	0.0835	0.0266	0.0974
	4	0.0233	0.0842	0.0272	0.0968
	5	0.0232	0.0851	0.0283	0.0975
	6	0.0250	0.0837	0.0261	0.0972
Media	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	0.0237	0.0850	0.0272	0.0970
Desviación estándar	$S_y = \sqrt{\frac{(y_i - m)^2}{N - 1}}$	0.0009	0.0016	0.0008	0.0005
Incertidumbre	$E_y = \frac{S_y}{\sqrt{N}}$	± 0.0004	± 0.0006	± 0.0003	± 0.0002
Error porcentual	$\%E = \frac{E_y}{\bar{y}}$	± 1.5 %	± 0.8 %	± 1.2 %	± 0.2 %

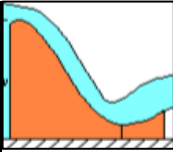
Disipador D. S = 0.01

	S = 1	Q = 11 l/s		Q = 13 l/s	
		Tirante conjugado		Tirante conjugado	
		C. menor	C. mayor	C. menor	C. mayor
N° réplicas		y₁	y₂	y₁	y₂
		(m)	(m)	(m)	(m)
DISIPADOR D	1	0.0158	0.0862	0.0186	0.0989
	2	0.0175	0.0858	0.0179	0.0967
	3	0.0155	0.0890	0.0183	0.0971
	4	0.0155	0.0898	0.0185	0.0988
	5	0.0159	0.0892	0.0174	0.0983
	6	0.0151	0.0868	0.0171	0.0984
Media	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	0.0159	0.0878	0.0180	0.0980
Desviación estándar	$S_y = \sqrt{\frac{(y_i - m)^2}{N - 1}}$	0.0008	0.0017	0.0006	0.0009
Incertidumbre	$E_y = \frac{S_y}{\sqrt{N}}$	± 0.0003	± 0.0007	± 0.0002	± 0.0004
Error porcentual	$\%E = \frac{E_y}{\bar{y}}$	± 2.2 %	± 0.8 %	± 1.4 %	± 0.4 %

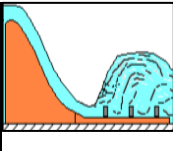
Disipador A, S = 0.02

	S = 2	Q = 11 l/s		Q = 13 l/s	
		Tirante aguas abajo		Tirante aguas abajo	
		Inicio salto	Final salto	Inicio salto	Final salto
N° réplicas		y₁	y₂	y₁	y₂
		(m)	(m)	(m)	(m)
DISIPADOR A	1	0.0201	0.1232	0.0230	0.1369
	2	0.0195	0.1221	0.0220	0.1358
	3	0.0198	0.1223	0.0226	0.1356
	4	0.0200	0.1231	0.0217	0.1368
	5	0.0195	0.1228	0.0221	0.1349
	6	0.0189	0.1236	0.0225	0.1351
Promedio	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	0.0196	0.1228	0.0223	0.1358
Desviación estándar	$S_y = \sqrt{\frac{(y_i - m)^2}{N - 1}}$	0.0005	0.0006	0.0005	0.0009
Incertidumbre	$E_y = \frac{S_y}{\sqrt{N}}$	± 0.0002	± 0.0002	± 0.0002	± 0.0003
Error porcentual	$\%E = \frac{E_y}{\bar{y}}$	± 0.9 %	± 0.2 %	± 0.9 %	± 0.3 %

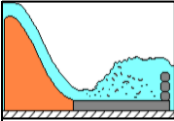
Disipador B, S = 0.02

	S = 2	Q = 11 l/s		Q = 13 l/s	
		Tirante conjugado			
		C. menor	C. mayor	C. menor	C. mayor
N° réplicas	y_1	y_2	y_1	y_2	
	(m)	(m)	(m)	(m)	
DISIPADOR B	1	0.0161	0.1263	0.0187	0.1374
	2	0.0161	0.1259	0.0195	0.1384
	3	0.0156	0.1264	0.0193	0.1371
	4	0.0159	0.1260	0.0198	0.1386
	5	0.0160	0.1255	0.0194	0.1379
	6	0.0154	0.1265	0.0198	0.1375
Media	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	0.0158	0.1261	0.0194	0.1378
Desviación estándar	$S_y = \sqrt{\frac{(y_i - m)^2}{N - 1}}$	0.0003	0.0004	0.0004	0.0006
Incertidumbre	$E_y = \frac{S_y}{\sqrt{N}}$	± 0.0001	± 0.0001	± 0.0002	± 0.0002
Error porcentual	$\%E = \frac{E_y}{\bar{y}}$	± 0.8 %	± 0.1 %	± 0.9 %	± 0.2 %

Disipador C, S = 0.02

	S = 2	Q = 13 l/s	
		Tirante conjugado	
		C. menor	C. mayor
N° réplicas	y_1	y_2	
	(m)	(m)	
DISIPADOR C	1	0.0251	0.1039
	2	0.0256	0.1042
	3	0.0257	0.1040
	4	0.0244	0.1028
	5	0.0270	0.1040
	6	0.0245	0.1022
Media	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	0.0254	0.1035
Desviación estándar	$S_y = \sqrt{\frac{(y_i - m)^2}{N - 1}}$	0.0010	0.0008
Incertidumbre	$E_y = \frac{S_y}{\sqrt{N}}$	± 0.0004	± 0.0003
Error porcentual	$\%E = \frac{E_y}{\bar{y}}$	± 1.6 %	± 0.3 %

Disipador D, S = 0.02

	S = 2	Q = 11 l/s		Q = 13 l/s	
		Tirante conjugado		Tirante conjugado	
		C. menor	C. mayor	C. menor	C. mayor
DISIPADOR D	N° réplicas	y₁	y₂	y₁	y₂
		(m)	(m)	(m)	(m)
	1	0.0155	0.0928	0.0193	0.1130
	2	0.0154	0.0914	0.0192	0.1106
	3	0.0153	0.0922	0.0196	0.1119
	4	0.0150	0.0928	0.0191	0.1118
	5	0.0154	0.0914	0.0193	0.1104
6	0.0154	0.0939	0.0198	0.1094	
Media	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	0.0153	0.0924	0.0194	0.1112
Desviación estándar	$S_y = \sqrt{\frac{(y_i - m)^2}{N - 1}}$	0.0002	0.0009	0.0003	0.0013
Incertidumbre	$E_y = \frac{S_y}{\sqrt{N}}$	± 0.0001	± 0.0004	± 0.0001	± 0.0005
Error porcentual	$\%E = \frac{E_y}{\bar{y}}$	± 0.5 %	± 0.4 %	± 0.6 %	± 0.5 %

Anexo II: Formación del Salto Hidráulico en el Disipador A

Exploración de Caudales: Disipador A, S = 0

Réplicas	Caudal	Tirantes Conjugados		Froude
	Q (l/s)	y ₁ (m)	y ₂ (m)	Fr ₁
1	9.024	0.016	0.095	4.7
2	9.030	0.017	0.094	4.4
3	9.011	0.016	0.095	4.9
4	9.030	0.016	0.096	4.7
5	9.007	0.016	0.095	4.6
6	9.002	0.016	0.094	4.6
1	11.038	0.020	0.108	4.1
2	10.846	0.019	0.107	4.2
3	11.029	0.020	0.108	4.1
4	11.003	0.020	0.107	4.1
5	11.012	0.020	0.107	4.1
6	11.028	0.020	0.108	4.1
1	13.007	0.024	0.120	3.7
2	13.014	0.024	0.120	3.7
3	13.004	0.024	0.118	3.7
4	13.014	0.024	0.118	3.8
5	12.997	0.025	0.120	3.6
6	13.007	0.024	0.118	3.6
1	17.002	0.032	0.142	3.2
2	17.004	0.030	0.143	3.5
3	16.994	0.031	0.142	3.3
4	17.007	0.031	0.141	3.4
5	17.018	0.032	0.141	3.1
6	17.034	0.030	0.141	3.4
1	21.001	0.035	0.157	3.3
2	21.024	0.035	0.157	3.4
3	20.991	0.035	0.157	3.4
4	21.004	0.035	0.157	3.4
5	20.999	0.036	0.157	3.2
6	21.006	0.035	0.156	3.5
1	25.023	0.041	0.171	3.2
2	25.018	0.040	0.171	3.4
3	25.024	0.040	0.171	3.3
4	25.031	0.040	0.171	3.3
5	25.011	0.040	0.170	3.3
6	25.020	0.040	0.172	3.3
1	29.017	0.047	0.183	3.0
2	28.995	0.048	0.182	3.0
3	29.002	0.047	0.182	3.1
4	29.014	0.047	0.182	3.0
5	29.000	0.048	0.182	3.0
6	29.007	0.047	0.182	3.0

Exploración de Caudales, Disipador A, S = 0.01

Réplicas	Caudal Q (l/s)	Tirantes Conjugados		Nº Froude Fr ₁ $Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{gy_1}}$
		C. Menor y ₁ (m)	C. Mayor y ₂ (m)	
1	9.009	0.017	0.102	4.3
2	8.980	0.017	0.103	4.3
3	8.995	0.017	0.102	4.4
4	9.024	0.017	0.101	4.5
5	8.992	0.016	0.102	4.6
6	8.985	0.016	0.101	4.6
1	11.035	0.019	0.115	4.5
2	11.045	0.019	0.115	4.3
3	11.038	0.019	0.115	4.3
4	11.047	0.020	0.114	4.2
5	11.008	0.020	0.114	4.1
6	10.960	0.019	0.115	4.4
1	13.021	0.024	0.128	3.8
2	13.038	0.022	0.126	4.2
3	13.019	0.023	0.126	4.0
4	12.990	0.023	0.129	3.9
5	13.020	0.023	0.126	4.0
6	12.995	0.023	0.127	3.9
1	17.003	0.027	0.148	4.0
2	17.013	0.028	0.149	3.9
3	17.024	0.028	0.147	3.9
4	17.034	0.028	0.148	3.9
5	17.000	0.028	0.148	3.8
6	17.019	0.028	0.149	3.9
1	21.019	0.034	0.168	3.6
2	21.031	0.033	0.167	3.7
3	21.005	0.034	0.167	3.5
4	21.043	0.034	0.168	3.6
5	21.000	0.034	0.168	3.6
6	21.017	0.033	0.165	3.7
1	25.010	0.040	0.183	3.3
2	25.022	0.040	0.184	3.3
3	25.004	0.041	0.185	3.2
4	25.007	0.041	0.182	3.2
5	25.024	0.040	0.180	3.4
6	24.982	0.039	0.183	3.4
1	29.032	0.047	0.198	3.0
2	29.034	0.047	0.197	3.0
3	28.996	0.046	0.197	3.1
4	29.017	0.047	0.197	3.0
5	28.880	0.048	0.200	3.0

6	28.978	0.047	0.198	3.1
---	--------	-------	-------	-----

Exploración de Caudales, Disipador A, S = 0.02

Réplicas	Caudal Q (l/s)	Tirantes Conjugados		N° Froude Fr ₁ $Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{gy_1}}$
		C. Menor y ₁ (m)	C. Mayor y ₂ (m)	
1	10.946	0.020	0.123	4.1
2	11.045	0.019	0.122	4.3
3	11.045	0.020	0.122	4.2
4	11.048	0.020	0.123	4.2
5	11.047	0.020	0.123	4.3
6	11.077	0.019	0.124	4.5
1	13.022	0.023	0.137	4.0
2	13.007	0.022	0.136	4.2
3	13.012	0.023	0.136	4.1
4	12.996	0.022	0.137	4.3
5	12.994	0.022	0.135	4.2
6	13.016	0.022	0.135	4.1
1	17.015	0.027	0.159	4.1
2	16.997	0.027	0.159	4.2
3	17.001	0.027	0.159	4.1
4	17.010	0.027	0.159	4.1
5	17.000	0.027	0.157	4.2
6	17.001	0.027	0.158	4.1
1	21.012	0.031	0.179	4.1
2	21.007	0.032	0.179	4.0
3	21.025	0.032	0.180	3.9
4	20.987	0.032	0.179	3.9
5	20.994	0.032	0.180	3.9
6	21.029	0.032	0.179	3.8
1	25.020	0.037	0.200	3.7
2	24.975	0.037	0.200	3.8
3	24.992	0.037	0.197	3.8
4	25.004	0.037	0.199	3.8
5	25.009	0.037	0.199	3.7
6	25.015	0.037	0.199	3.8

Anexo III: Formación del Salto Hidráulico en el Disipador B

Exploración de Caudales, Disipador B, S = 0

Réplicas	Caudal	Tirantes Conjugados		Froude
	Q	y ₁	y ₂	Fr ₁
	(l/s)	(m)	(m)	
1	7.011	0.012	0.088	5.4
2	7.003	0.012	0.091	5.6
3	7.010	0.012	0.091	5.5
4	7.019	0.013	0.090	5.2
5	7.020	0.013	0.091	5.3
6	6.995	0.012	0.091	5.5
1	11.022	0.018	0.108	4.8
2	11.014	0.018	0.109	5.0
3	11.025	0.018	0.108	4.8
4	11.017	0.018	0.109	4.9
5	10.994	0.018	0.107	5.0
6	11.024	0.018	0.109	4.8
1	13.027	0.021	0.120	4.6
2	13.058	0.021	0.121	4.7
3	13.009	0.022	0.121	4.3
4	12.890	0.021	0.121	4.4
5	13.007	0.020	0.121	4.9
6	13.004	0.021	0.119	4.4
1	15.015	0.025	0.131	4.1
2	15.008	0.024	0.131	4.2
3	15.003	0.025	0.131	4.0
4	14.988	0.024	0.131	4.2
5	15.005	0.025	0.131	4.2
6	15.001	0.024	0.131	4.2
1	29.003	0.045	0.169	3.2
2	29.065	0.045	0.170	3.3
3	29.053	0.044	0.168	3.3
4	29.029	0.044	0.169	3.3
5	29.049	0.044	0.167	3.3
6	29.020	0.045	0.166	3.3

Exploración de Caudales, Disipador B, S = 0.01

Réplicas	Caudal	Tirantes Conjugados		Nº Froude
	Q	C. Menor	C. Mayor	Fr ₁
		y ₁	y ₂	
	(l/s)	(m)	(m)	$Fr_1 = \frac{v}{\sqrt{gy_1}}$
1	7.013	0.011	0.098	6.7
2	7.003	0.011	0.096	6.7
3	6.985	0.012	0.096	5.7

4	7.001	0.011	0.096	6.7
5	7.021	0.011	0.096	6.1
6	7.013	0.011	0.096	6.7
1	11.001	0.017	0.119	5.5
2	10.990	0.018	0.119	4.9
3	10.995	0.016	0.117	5.9
4	11.013	0.016	0.119	5.6
5	11.002	0.017	0.119	5.5
6	11.026	0.016	0.117	6.0
1	13.001	0.021	0.128	4.6
2	13.017	0.021	0.128	4.7
3	12.993	0.020	0.128	4.9
4	13.001	0.020	0.128	4.7
5	12.997	0.020	0.128	4.8
6	12.971	0.020	0.128	4.8
1	15.012	0.024	0.140	4.3
2	15.016	0.023	0.141	4.6
3	15.015	0.023	0.139	4.5
4	15.012	0.024	0.140	4.2
5	15.017	0.024	0.140	4.3
6	15.001	0.024	0.140	4.3

Exploración de Caudales, Disipador B, S = 0.02

Réplicas	Caudal Q (l/s)	Tirantes Conjugados		N° Froude $Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{gy_1}}$
		C. Menor y ₁ (m)	C. Mayor y ₂ (m)	
1	7.005	0.011	0.103	6.1
2	7.009	0.008	0.103	9.9
3	7.001	0.010	0.102	7.1
4	7.015	0.010	0.102	6.9
5	6.994	0.009	0.103	8.1
6	7.001	0.010	0.102	7.0
1	9.015	0.013	0.111	6.5
2	9.010	0.012	0.111	7.0
3	9.006	0.013	0.111	6.5
4	9.017	0.012	0.112	7.0
5	9.012	0.012	0.112	7.3
6	9.007	0.012	0.112	7.1
1	11.019	0.016	0.126	5.7
2	11.017	0.016	0.126	5.8
3	10.999	0.016	0.126	6.0
4	11.013	0.016	0.126	5.8
5	11.001	0.016	0.125	5.8
6	10.983	0.015	0.126	6.1
1	13.018	0.019	0.137	5.4

2	13.015	0.020	0.138	5.1
3	13.022	0.019	0.137	5.2
4	13.017	0.020	0.139	5.0
5	13.007	0.019	0.138	5.1
6	12.994	0.020	0.138	5.0
B	14.997	0.023	0.150	4.5
1	15.002	0.022	0.152	4.8
2	15.019	0.023	0.149	4.5
3	15.009	0.022	0.148	5.1
4	15.031	0.022	0.150	5.0
5	15.012	0.023	0.151	4.5
6	25.002	0.039	0.220	3.5

Anexo IV: Formación del Salto Hidráulico en el Disipador C

Exploración de Caudales, Disipador C, S = 0

Réplicas	Caudal	Tirantes Conjugados		Froude
	Q	y ₁	y ₂	Fr ₁
	(l/s)	(m)	(m)	
1	11.014	0.025	0.073	3.0
2	11.007	0.023	0.076	3.3
3	11.000	0.023	0.073	3.3
4	10.984	0.024	0.073	3.1
5	11.010	0.022	0.073	3.5
6	10.995	0.021	0.073	3.8
1	13.030	0.026	0.082	3.3
2	13.000	0.025	0.080	3.5
3	13.021	0.025	0.079	3.5
4	13.003	0.027	0.080	3.1
5	12.975	0.025	0.081	3.5
6	13.000	0.026	0.081	3.3
1	22.993	0.049	0.147	2.2
2	23.030	0.049	0.146	2.2
3	22.989	0.049	0.146	2.3
4	23.020	0.050	0.148	2.2
5	23.021	0.049	0.145	2.3
6	23.024	0.049	0.148	2.3
1	25.004	0.055	0.153	2.1
2	25.031	0.054	0.156	2.1
3	25.005	0.054	0.156	2.1
4	25.003	0.054	0.159	2.1
5	25.010	0.054	0.155	2.1
6	24.991	0.053	0.157	2.2
1	27.004	0.058	0.166	2.0
2	26.997	0.058	0.165	2.0
3	26.996	0.059	0.167	2.0

4	26.985	0.058	0.163	2.1
5	27.005	0.059	0.165	2.0
6	27.038	0.059	0.167	2.0
1	29.005	0.063	0.172	1.9
2	29.010	0.065	0.171	1.9
3	28.990	0.064	0.173	1.9
4	29.007	0.062	0.172	2.0
5	29.001	0.063	0.171	1.9
6	28.970	0.063	0.171	1.9

Exploración de Caudales, Disipador C, S = 0.01

Réplicas	Caudal Q (l/s)	Tirantes Conjugados		Nº Froude $Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{gy_1}}$
		C. Menor y ₁ (m)	C. Mayor y ₂ (m)	
		1	11.015	
2	11.000	0.025	0.086	3.0
3	11.015	0.023	0.083	3.4
4	11.010	0.023	0.084	3.3
5	11.018	0.023	0.085	3.3
6	11.013	0.025	0.084	3.0
1	13.020	0.027	0.097	3.1
2	13.025	0.028	0.096	3.0
3	13.005	0.027	0.097	3.2
4	13.017	0.027	0.097	3.1
5	13.027	0.028	0.098	2.9
6	13.030	0.026	0.097	3.3
1	17.015	0.036	0.111	2.6
2	17.005	0.036	0.112	2.7
3	17.032	0.036	0.111	2.7
4	17.012	0.036	0.112	2.7
5	17.023	0.035	0.112	2.7
6	17.046	0.036	0.111	2.7
1	28.998	0.064	0.183	1.9
2	29.008	0.063	0.181	1.9
3	29.025	0.065	0.180	1.9
4	29.032	0.063	0.184	1.9
5	29.012	0.063	0.182	1.9
6	28.990	0.065	0.182	1.9

Exploración de Caudales, Disipador C, S = 0.02

Réplicas	Caudal Q	Tirantes Conjugados		Nº Froude Fr ₁
		C. Menor y ₁	C. Mayor y ₂	

	(l/s)	(m)	(m)	$Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{gy_1}}$
1	12.995	0.025	0.104	3.5
2	13.020	0.026	0.104	3.4
3	13.000	0.026	0.104	3.4
4	13.038	0.024	0.103	3.7
5	13.021	0.027	0.104	3.1
6	12.998	0.025	0.102	3.6
1	17.007	0.035	0.116	2.7
2	17.010	0.035	0.118	2.7
3	16.990	0.034	0.117	2.8
4	17.000	0.034	0.117	2.8
5	17.015	0.035	0.116	2.8
6	17.011	0.035	0.117	2.7

Anexo V: Formación del Salto Hidráulico en el Disipador D

Exploración de Caudales, Disipador D, S = 0

Réplicas	Caudal	Tirantes Conjugados		Froude
	Q	y ₁	y ₂	Fr ₁
	(l/s)	(m)	(m)	
1	9.010	0.017	0.077	4.3
2	9.017	0.017	0.078	4.4
3	9.015	0.017	0.079	4.5
4	9.016	0.017	0.079	4.2
5	9.002	0.016	0.079	4.6
6	8.994	0.015	0.079	5.1
1	11.021	0.017	0.083	5.1
2	11.028	0.017	0.084	5.5
3	11.019	0.016	0.083	5.8
4	11.026	0.017	0.084	5.4
5	11.040	0.016	0.083	5.6
6	11.023	0.016	0.084	5.9
1	13.037	0.018	0.096	5.5
2	12.997	0.020	0.096	5.1
3	13.018	0.019	0.097	5.2
4	13.014	0.019	0.097	5.2
5	13.013	0.020	0.097	5.1
6	13.007	0.019	0.095	5.1
1	15.022	0.024	0.100	4.2
2	15.012	0.023	0.102	4.5
3	14.990	0.024	0.101	4.4
4	15.006	0.023	0.101	4.6
5	15.004	0.023	0.101	4.5
6	15.005	0.023	0.100	4.7

Exploración de Caudales, Disipador D, S = 0.01

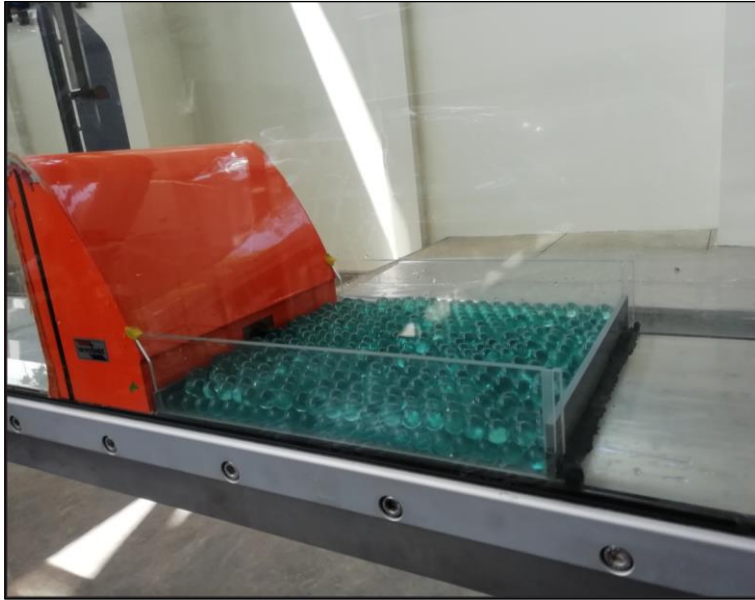
Réplicas	Caudal	Tirantes Conjugados		Nº Froude
	Q	C. Menor	C. Mayor	Fr ₁
	(l/s)	y ₁	y ₂	$Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{gy_1}}$
1	11.015	0.016	0.086	5.9
2	11.003	0.018	0.086	5.1
3	11.006	0.015	0.089	6.1
4	11.019	0.015	0.090	6.1
5	11.003	0.016	0.089	5.8
6	11.016	0.015	0.087	6.3
1	12.997	0.019	0.099	5.4
2	13.005	0.018	0.097	5.8
3	13.010	0.018	0.097	5.6

4	13.012	0.019	0.099	5.5
5	12.995	0.017	0.098	6.0
6	13.001	0.017	0.098	6.2
1	15.012	0.024	0.106	4.3
2	15.032	0.024	0.107	4.4
3	15.035	0.023	0.106	4.5
4	14.995	0.023	0.106	4.7
5	15.002	0.023	0.106	4.7
6	15.001	0.024	0.106	4.3

Exploración de Caudales, Disipador D, S = 0.02

Réplicas	Caudal Q (l/s)	Tirantes Conjugados		Nº Froude $Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{gy_1}}$
		C. Menor y ₁ (m)	C. Mayor y ₂ (m)	
1	10.995	0.015	0.093	6.1
2	11.017	0.015	0.091	6.2
3	11.025	0.015	0.092	6.2
4	11.005	0.015	0.093	6.4
5	11.030	0.015	0.091	6.1
6	11.007	0.015	0.094	6.2
1	13.015	0.019	0.113	5.2
2	12.995	0.019	0.111	5.2
3	13.007	0.020	0.112	5.0
4	12.980	0.019	0.112	5.2
5	12.980	0.019	0.110	5.2
6	12.997	0.020	0.109	5.0
1	15.000	0.022	0.123	5.0
2	15.026	0.023	0.122	4.6
3	15.017	0.023	0.121	4.5
4	15.032	0.023	0.121	4.5
5	15.010	0.023	0.123	4.5
6	15.007	0.023	0.121	4.6

Anexo VI: Transformación del disipador D



Disipador D de fábrica



Disipador D compuesto de gravas

Se colocó gravas de diferentes tamaños y se niveló dentro de la bandeja, sin embargo, no funcionó, dado que estas cambiaban de posición debido al movimiento del agua que fluía a gran velocidad, era difícil de lograr réplicas en condiciones diferentes.



Disipador D terminado

En la foto se observa el disipador D terminado hecho de concreto, fue elaborado en el laboratorio de Prueba y Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional Agraria La Molina y se le dimensionó a la medida de la bandeja, la cual es el accesorio que conforma el disipador original, en dicho elemento se fijaron las gravas de distintos tamaños a manera de incrustaciones formando un solo cuerpo con el concreto con la finalidad que no se suelten durante el ensayo. Luego de varias pruebas se comprobó la estabilidad del concreto en el canal, el material fue idóneo para cumplir con el objetivo planteado.

Anexo VII: Características básicas del Salto hidráulico

En Lecho Horizontal ($S = 0$) y Caudal 11 l/s

Características del Salto Hidráulico. (Disipador A, $S = 0$, $Q = 11$ l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura Del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE	E ₂ /E ₁	h _j	%
	y ₁	y ₂									
1	0.020	0.108	4.1	0.3	0.73	0.002	0.002	0.08	0.60	0.09	40
2	0.019	0.107	4.2	0.3	0.73	0.002	0.002	0.08	0.58	0.09	42
3	0.020	0.108	4.1	0.3	0.73	0.002	0.002	0.08	0.60	0.09	40
4	0.020	0.107	4.1	0.3	0.73	0.002	0.002	0.08	0.59	0.09	41
5	0.020	0.107	4.1	0.3	0.73	0.002	0.002	0.08	0.59	0.09	41
6	0.020	0.108	4.1	0.3	0.73	0.002	0.002	0.08	0.60	0.09	40
Media	0.020	0.107	4.1	0.3	0.73	0.002	0.002	0.08	0.59	0.09	41
Desviación estándar	0.000	0.001	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.00	0.01	0.00	1
CV %	1.28	0.76	1.30	0.93	0.00	0.26	1.27	3.05	1.42	0.84	2.06

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador B, S = 0, Q = 11 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura Del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE	E ₂ /E ₁	h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.018	0.108	4.8	0.3	0.83	0.002	0.002	0.11	0.50	0.09	50
2	0.018	0.109	5.0	0.3	0.83	0.002	0.002	0.12	0.48	0.09	52
3	0.018	0.108	4.8	0.3	0.83	0.002	0.002	0.12	0.50	0.09	50
4	0.018	0.109	4.9	0.3	0.83	0.002	0.002	0.12	0.49	0.09	51
5	0.018	0.107	5.0	0.3	0.83	0.002	0.002	0.12	0.48	0.09	52
6	0.018	0.109	4.8	0.3	0.83	0.002	0.002	0.11	0.50	0.09	50
Media	0.018	0.108	4.9	0.3	0.83	0.002	0.002	0.12	0.49	0.09	51
Desviación estándar	0.000	0.001	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.01	0.00	1
CV %	1.30	0.47	1.86	0.64	0.00	1.06	0.71	4.31	2.25	0.56	2.18

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador C, S = 0, Q = 11 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	Ls	Fs ₁	Fs ₂	ΔE	E ₂ /E ₁	h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.025	0.073	3.0	0.6	0.30	0.002	0.001	0.05	0.63	0.05	37
2	0.023	0.076	3.3	0.6	0.30	0.002	0.001	0.06	0.58	0.05	42
3	0.023	0.073	3.3	0.6	0.30	0.002	0.001	0.07	0.57	0.05	43
4	0.024	0.073	3.1	0.6	0.30	0.002	0.001	0.05	0.61	0.05	39
5	0.022	0.073	3.5	0.6	0.30	0.002	0.001	0.08	0.53	0.05	47
6	0.021	0.073	3.8	0.6	0.30	0.002	0.001	0.09	0.49	0.05	51
Media	0.023	0.073	3.3	0.6	0.30	0.002	0.001	0.07	0.57	0.05	43
Desviación estándar	0.001	0.001	0.3	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.05	0.00	5
CV %	5.97	1.53	9.10	2.20	0.00	5.26	1.23	21.74	9.19	3.52	12.16

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador D, S = 0, Q = 11 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE	E ₂ /E ₁	h _j	%
	y ₁	y ₂									
1	0.017	0.083	5.1	0.5	0.56	0.002	0.002	0.15	0.38	0.07	62
2	0.017	0.084	5.5	0.5	0.56	0.003	0.002	0.17	0.35	0.07	65
3	0.016	0.083	5.8	0.5	0.56	0.003	0.002	0.19	0.33	0.07	67
4	0.017	0.084	5.4	0.5	0.56	0.003	0.002	0.17	0.36	0.07	64
5	0.016	0.083	5.6	0.5	0.56	0.003	0.002	0.18	0.34	0.07	66
6	0.016	0.084	5.9	0.5	0.56	0.003	0.002	0.20	0.32	0.07	68
Media	0.016	0.083	5.6	0.5	0.56	0.003	0.002	0.18	0.34	0.07	66
Desviación estándar	0.001	0.001	0.3	0.0	0.00	0.000	0.000	0.02	0.02	0.00	2
CV %	3.35	0.72	4.96	1.09	0.00	3.15	0.75	9.04	5.94	1.43	3.13

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

En Lecho Horizontal ($S = 0$) y Caudal 13 l/s

Características del Salto Hidráulico. (Disipador A, $S = 0$, $Q = 13$ l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr_1	Fr_2		Fs_1	Fs_2				
	y_1	y_2									
	(m)	(m)			(m)			(m)		%	
1	0.024	0.120	3.7	0.3	0.79	0.002	0.003	0.06	0.67	0.10	33
2	0.024	0.120	3.7	0.3	0.79	0.002	0.003	0.06	0.68	0.10	32
3	0.024	0.118	3.7	0.3	0.79	0.002	0.003	0.07	0.66	0.09	34
4	0.024	0.118	3.8	0.3	0.79	0.003	0.003	0.07	0.64	0.09	36
5	0.025	0.120	3.6	0.3	0.79	0.002	0.003	0.05	0.70	0.10	30
6	0.024	0.118	3.6	0.3	0.79	0.002	0.003	0.06	0.68	0.09	32
Media	0.024	0.119	3.7	0.3	0.79	0.002	0.003	0.06	0.67	0.10	33
Desviación estándar	0.000	0.001	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.02	0.00	2
CV %	1.75	0.89	2.68	1.35	0.00	1.64	1.28	9.47	3.25	1.03	6.56

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador B, S = 0, Q = 13 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE	E ₂ /E ₁	h _j	%
	y ₁	y ₂									
1	0.021	0.120	4.6	0.3	0.91	0.003	0.003	0.11	0.53	0.10	47
2	0.021	0.121	4.7	0.3	0.91	0.003	0.003	0.12	0.51	0.10	49
3	0.022	0.121	4.3	0.3	0.91	0.003	0.003	0.10	0.57	0.10	43
4	0.021	0.121	4.4	0.3	0.91	0.003	0.003	0.10	0.56	0.10	44
5	0.020	0.121	4.9	0.3	0.91	0.003	0.003	0.14	0.48	0.10	52
6	0.021	0.119	4.4	0.3	0.91	0.003	0.003	0.11	0.54	0.10	46
Media	0.021	0.120	4.6	0.3	0.91	0.003	0.003	0.11	0.53	0.10	47
Desviación estándar	0.001	0.001	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.03	0.00	3
CV %	3.18	0.54	5.04	0.83	0.00	3.39	0.83	12.58	5.67	1.07	6.45

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador C, S = 0, Q = 13 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE	E ₂ /E ₁	h _j	%
	y ₁	y ₂									
1	0.026	0.082	3.3	0.6	0.36	0.002	0.002	0.07	0.58	0.06	42
2	0.025	0.080	3.5	0.6	0.36	0.002	0.002	0.09	0.53	0.05	47
3	0.025	0.079	3.5	0.6	0.36	0.002	0.002	0.09	0.52	0.05	48
4	0.027	0.080	3.1	0.6	0.36	0.002	0.002	0.06	0.60	0.05	40
5	0.025	0.081	3.5	0.6	0.36	0.002	0.002	0.08	0.53	0.06	47
6	0.026	0.081	3.3	0.6	0.36	0.002	0.002	0.07	0.56	0.06	44
Media	0.026	0.080	3.4	0.6	0.36	0.002	0.002	0.08	0.55	0.05	45
Desviación estándar	0.001	0.001	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.03	0.00	3
CV %	3.59	1.30	5.22	1.98	0.00	2.99	0.94	12.30	5.79	2.04	7.18

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador D, S = 0, Q = 13 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂		Fs ₁	Fs ₂				
	y ₁ (m)	y ₂ (m)			ΔE (m)			E ₂ /E ₁	h _j (m)	%	
1	0.018	0.096	5.5	0.5	0.62	0.003	0.002	0.20	0.35	0.08	65
2	0.020	0.096	5.1	0.5	0.62	0.003	0.002	0.16	0.39	0.08	61
3	0.019	0.097	5.2	0.5	0.62	0.003	0.002	0.17	0.39	0.08	61
4	0.019	0.097	5.2	0.5	0.62	0.003	0.002	0.17	0.38	0.08	62
5	0.020	0.097	5.1	0.5	0.62	0.003	0.002	0.16	0.40	0.08	60
6	0.019	0.095	5.1	0.5	0.62	0.003	0.002	0.17	0.39	0.08	61
Media	0.019	0.096	5.2	0.5	0.62	0.003	0.002	0.17	0.38	0.08	62
Desviación estándar	0.000	0.001	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.02	0.00	2
CV %	2.20	0.69	3.51	1.04	0.00	2.33	0.77	6.93	4.05	1.06	2.51

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

En Lecho inclinado (S = 0.01) y Caudal 11 l/s

Características del Salto Hidráulico. (Disipador A, S = 0.01, Q = 11 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂		Fs ₁	Fs ₂				
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.019	0.115	4.5	0.3	0.74	0.002	0.002	0.09	0.57	0.10	43
2	0.019	0.115	4.3	0.3	0.74	0.002	0.002	0.08	0.60	0.10	40
3	0.019	0.115	4.3	0.3	0.74	0.002	0.002	0.08	0.59	0.10	41
4	0.020	0.114	4.2	0.3	0.74	0.002	0.002	0.08	0.61	0.09	39
5	0.020	0.114	4.1	0.3	0.74	0.002	0.002	0.07	0.63	0.09	37
6	0.019	0.115	4.4	0.3	0.74	0.002	0.002	0.08	0.59	0.10	41
Media	0.019	0.115	4.3	0.3	0.74	0.002	0.002	0.08	0.60	0.10	40
Desviación estándar	0.000	0.001	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.02	0.00	2
CV %	2.21	0.46	3.29	0.78	0.00	2.04	0.72	8.83	3.44	0.95	5.08

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador B, S = 0.01, Q = 11 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE	E ₂ /E ₁	h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.017	0.119	5.5	0.3	0.82	0.003	0.002	0.14	0.47	0.10	53
2	0.018	0.119	4.9	0.3	0.82	0.002	0.002	0.11	0.53	0.10	47
3	0.016	0.117	5.9	0.3	0.82	0.003	0.002	0.17	0.42	0.10	58
4	0.016	0.119	5.6	0.3	0.82	0.003	0.002	0.15	0.45	0.10	55
5	0.017	0.119	5.5	0.3	0.82	0.003	0.002	0.14	0.46	0.10	54
6	0.016	0.117	6.0	0.3	0.82	0.003	0.002	0.17	0.41	0.10	59
Media	0.016	0.119	5.6	0.3	0.82	0.003	0.002	0.15	0.46	0.10	54
Desviación estándar	0.001	0.001	0.4	0.0	0.00	0.000	0.000	0.02	0.04	0.00	4
CV %	4.54	0.77	6.64	1.21	0.00	4.34	1.20	15.12	8.88	0.71	7.50

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador C, S = 0.01, Q = 11 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.023	0.088	3.3	0.5	0.25	0.002	0.002	0.05	0.64	0.06	36
2	0.025	0.086	3.0	0.5	0.25	0.002	0.002	0.04	0.69	0.06	31
3	0.023	0.083	3.4	0.5	0.25	0.002	0.002	0.06	0.61	0.06	39
4	0.023	0.084	3.3	0.5	0.25	0.002	0.002	0.06	0.63	0.06	37
5	0.023	0.085	3.3	0.5	0.25	0.002	0.002	0.06	0.63	0.06	37
6	0.025	0.084	3.0	0.5	0.25	0.002	0.002	0.04	0.69	0.06	31
Media	0.024	0.085	3.2	0.5	0.25	0.002	0.002	0.05	0.65	0.06	35
Desviación estándar	0.001	0.002	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.04	0.00	4
CV %	3.64	1.86	5.34	2.76	0.00	3.12	2.02	15.06	5.51	3.09	10.14

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador D, S = 0.01, Q = 11 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.016	0.086	5.9	0.5	0.53	0.003	0.002	0.19	0.33	0.07	67
2	0.018	0.086	5.1	0.5	0.53	0.002	0.002	0.15	0.39	0.07	61
3	0.015	0.089	6.1	0.4	0.53	0.003	0.002	0.21	0.32	0.07	68
4	0.015	0.090	6.1	0.4	0.53	0.003	0.002	0.20	0.33	0.07	67
5	0.016	0.089	5.8	0.4	0.53	0.003	0.002	0.19	0.34	0.07	66
6	0.015	0.087	6.3	0.5	0.53	0.003	0.002	0.22	0.30	0.07	70
Media	0.016	0.088	5.9	0.5	0.53	0.003	0.002	0.19	0.34	0.07	66
Desviación estándar	0.001	0.002	0.4	0.0	0.00	0.000	0.000	0.03	0.03	0.00	3
CV %	5.33	1.95	7.46	2.92	0.00	4.87	2.21	13.17	9.28	3.14	4.69

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

En lecho inclinado (S = 0.01) y Caudal 13 l/s

Características del Salto Hidráulico. (Disipador A, S = 0.01, Q = 13 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	Ls	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.024	0.128	3.8	0.3	0.88	0.003	0.003	0.06	0.68	0.10	32
2	0.022	0.126	4.2	0.3	0.88	0.003	0.003	0.08	0.61	0.10	39
3	0.023	0.126	4.0	0.3	0.88	0.003	0.003	0.07	0.65	0.10	35
4	0.023	0.129	3.9	0.3	0.88	0.003	0.003	0.07	0.66	0.11	34
5	0.023	0.126	4.0	0.3	0.88	0.003	0.003	0.08	0.63	0.10	37
6	0.023	0.127	3.9	0.3	0.88	0.003	0.003	0.07	0.66	0.10	34
Media	0.023	0.127	4.0	0.3	0.88	0.003	0.003	0.07	0.65	0.10	35
Desviación estándar	0.000	0.001	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.02	0.00	2
CV %	1.83	0.88	2.83	1.40	0.00	1.82	1.33	10.07	3.68	0.89	6.84

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador B, S = 0.01, Q = 13 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.021	0.128	4.6	0.3	0.91	0.003	0.003	0.11	0.56	0.11	44
2	0.021	0.128	4.7	0.3	0.91	0.003	0.003	0.11	0.55	0.11	45
3	0.020	0.128	4.9	0.3	0.91	0.003	0.003	0.13	0.51	0.11	49
4	0.020	0.128	4.7	0.3	0.91	0.003	0.003	0.12	0.53	0.11	47
5	0.020	0.128	4.8	0.3	0.91	0.003	0.003	0.12	0.53	0.11	47
6	0.020	0.128	4.8	0.3	0.91	0.003	0.003	0.12	0.53	0.11	47
Media	0.020	0.128	4.8	0.3	0.91	0.003	0.003	0.12	0.53	0.11	47
Desviación estándar	0.000	0.000	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.02	0.00	2
CV %	1.74	0.17	2.54	0.28	0.00	1.51	0.27	6.19	2.87	0.47	3.29

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador C, S = 0.01, Q = 13 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.027	0.097	3.1	0.5	0.33	0.002	0.002	0.05	0.68	0.07	32
2	0.028	0.096	3.0	0.5	0.33	0.002	0.002	0.05	0.69	0.07	31
3	0.027	0.097	3.2	0.5	0.33	0.002	0.002	0.05	0.66	0.07	34
4	0.027	0.097	3.1	0.5	0.33	0.002	0.002	0.05	0.68	0.07	32
5	0.028	0.098	2.9	0.5	0.33	0.002	0.002	0.04	0.73	0.07	27
6	0.026	0.097	3.3	0.5	0.33	0.002	0.002	0.06	0.64	0.07	36
Media	0.027	0.097	3.1	0.5	0.33	0.002	0.002	0.05	0.68	0.07	32
Desviación estándar	0.001	0.001	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.03	0.00	3
CV %	2.88	0.52	4.31	0.79	0.00	2.43	0.57	13.19	4.21	1.43	9.00

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador D, S = 0.01, Q = 13 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	%
	y ₁	y ₂									
1	0.019	0.099	5.4	0.4	0.61	0.003	0.002	0.19	0.37	0.08	63
2	0.018	0.097	5.8	0.5	0.61	0.003	0.002	0.21	0.34	0.08	66
3	0.018	0.097	5.6	0.5	0.61	0.003	0.002	0.20	0.35	0.08	65
4	0.019	0.099	5.5	0.4	0.61	0.003	0.002	0.19	0.37	0.08	63
5	0.017	0.098	6.0	0.4	0.61	0.003	0.002	0.22	0.33	0.08	67
6	0.017	0.098	6.2	0.4	0.61	0.003	0.002	0.23	0.32	0.08	68
Media	0.018	0.098	5.7	0.5	0.61	0.003	0.002	0.21	0.34	0.08	66
Desviación estándar	0.001	0.001	0.3	0.0	0.00	0.000	0.000	0.02	0.02	0.00	2
CV %	3.39	0.94	5.13	1.43	0.00	3.23	1.05	9.56	6.28	1.30	3.29

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

En Lecho inclinado (S = 0.02) y Caudal 11 l/s

Características del Salto Hidráulico. (Disipador A, S = 0.02, Q = 11 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		Nº Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	Ls	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.020	0.123	4.1	0.3	0.78	0.002	0.003	0.06	0.68	0.10	32
2	0.019	0.122	4.3	0.3	0.78	0.002	0.003	0.08	0.63	0.10	37
3	0.020	0.122	4.2	0.3	0.78	0.002	0.003	0.07	0.65	0.10	35
4	0.020	0.123	4.2	0.3	0.78	0.002	0.003	0.06	0.66	0.10	34
5	0.020	0.123	4.3	0.3	0.78	0.002	0.003	0.07	0.63	0.10	37
6	0.019	0.124	4.5	0.3	0.78	0.002	0.003	0.09	0.60	0.10	40
Media	0.020	0.123	4.3	0.3	0.78	0.002	0.003	0.07	0.64	0.10	36
Desviación estándar	0.000	0.001	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.03	0.00	3
CV %	2.31	0.46	3.81	0.83	0.00	2.76	0.73	12.55	4.44	0.75	7.97

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador B, S = 0.02, Q = 11 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.016	0.126	5.7	0.3	0.82	0.003	0.003	0.15	0.47	0.11	53
2	0.016	0.126	5.8	0.3	0.82	0.003	0.003	0.15	0.46	0.11	54
3	0.016	0.126	6.0	0.3	0.82	0.003	0.003	0.17	0.44	0.11	56
4	0.016	0.126	5.8	0.3	0.82	0.003	0.003	0.16	0.45	0.11	55
5	0.016	0.125	5.8	0.3	0.82	0.003	0.003	0.15	0.46	0.11	54
6	0.015	0.126	6.1	0.3	0.82	0.003	0.003	0.17	0.43	0.11	57
Media	0.016	0.126	5.9	0.3	0.82	0.003	0.003	0.16	0.45	0.11	55
Desviación estándar	0.000	0.000	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.01	0.00	1
CV %	1.86	0.29	2.72	0.48	0.00	1.58	0.46	5.82	3.05	0.53	2.51

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador D, S = 0.02, Q = 11 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.015	0.093	6.1	0.4	0.64	0.003	0.002	0.20	0.33	0.08	67
2	0.015	0.091	6.2	0.4	0.64	0.003	0.002	0.21	0.32	0.08	68
3	0.015	0.092	6.2	0.4	0.64	0.003	0.002	0.21	0.32	0.08	68
4	0.015	0.093	6.4	0.4	0.64	0.003	0.002	0.22	0.31	0.08	69
5	0.015	0.091	6.1	0.4	0.64	0.003	0.002	0.21	0.33	0.08	67
6	0.015	0.094	6.2	0.4	0.64	0.003	0.002	0.20	0.33	0.08	67
Media	0.015	0.092	6.2	0.4	0.64	0.003	0.002	0.21	0.33	0.08	67
Desviación estándar	0.000	0.001	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.01	0.00	1
CV %	1.19	1.02	1.80	1.61	0.00	1.14	1.21	3.26	2.20	1.30	1.06

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

En Lecho inclinado (S = 0.02) y Caudal 13 l/s

Características del Salto Hidráulico. (Disipador A, S = 0.02, Q = 13 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		Nº Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	Ls	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.023	0.137	4.0	0.3	0.88	0.003	0.003	0.06	0.70	0.11	30
2	0.022	0.136	4.2	0.3	0.88	0.003	0.003	0.08	0.64	0.11	36
3	0.023	0.136	4.1	0.3	0.88	0.003	0.003	0.07	0.67	0.11	33
4	0.022	0.137	4.3	0.3	0.88	0.003	0.003	0.08	0.63	0.12	37
5	0.022	0.135	4.2	0.3	0.88	0.003	0.003	0.08	0.64	0.11	36
6	0.022	0.135	4.1	0.3	0.88	0.003	0.003	0.07	0.66	0.11	34
Media	0.022	0.136	4.2	0.3	0.88	0.003	0.003	0.07	0.66	0.11	34
Desviación estándar	0.000	0.001	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.02	0.00	2
CV %	2.16	0.63	3.15	0.92	0.00	1.82	1.01	10.27	3.64	0.82	6.93

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador B, S = 0.02, Q = 13 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.019	0.137	5.4	0.3	0.90	0.003	0.003	0.15	0.48	0.12	52
2	0.020	0.138	5.1	0.3	0.90	0.003	0.003	0.13	0.53	0.12	47
3	0.019	0.137	5.2	0.3	0.90	0.003	0.003	0.14	0.51	0.12	49
4	0.020	0.139	5.0	0.3	0.90	0.003	0.003	0.12	0.54	0.12	46
5	0.019	0.138	5.1	0.3	0.90	0.003	0.003	0.13	0.52	0.12	48
6	0.020	0.138	5.0	0.3	0.90	0.003	0.003	0.12	0.54	0.12	46
Media	0.019	0.138	5.1	0.3	0.90	0.003	0.003	0.13	0.52	0.12	48
Desviación estándar	0.000	0.001	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.02	0.00	2
CV %	2.14	0.42	3.32	0.64	0.00	2.13	0.69	8.57	4.08	0.42	4.45

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador C, S = 0.02, Q = 13 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.025	0.104	3.5	0.4	0.32	0.002	0.002	0.06	0.64	0.08	36
2	0.026	0.104	3.4	0.4	0.32	0.002	0.002	0.06	0.66	0.08	34
3	0.026	0.104	3.4	0.4	0.32	0.002	0.002	0.06	0.66	0.08	34
4	0.024	0.103	3.7	0.4	0.32	0.002	0.002	0.07	0.60	0.08	40
5	0.027	0.104	3.1	0.4	0.32	0.002	0.002	0.05	0.71	0.08	29
6	0.025	0.102	3.6	0.4	0.32	0.002	0.002	0.07	0.61	0.08	39
Media	0.025	0.104	3.4	0.4	0.32	0.002	0.002	0.06	0.65	0.08	35
Desviación estándar	0.001	0.001	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.04	0.00	4
CV %	3.81	0.80	5.59	1.22	0.00	3.28	0.98	17.09	6.40	0.85	11.64

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Características del Salto Hidráulico. (Disipador D, S = 0.02, Q = 13 l/s)

Réplicas	Tirantes conjugados		N° Froude		Longitud Salto	Fuerza específica		Pérdida de energía	Eficiencia	Altura del resalto	Disipación de Energía
	C. menor	C. mayor	Fr ₁	Fr ₂	L _s	Fs ₁	Fs ₂	ΔE		h _j	%
	y ₁ (m)	y ₂ (m)									
1	0.019	0.113	5.2	0.4	0.78	0.003	0.002	0.16	0.44	0.09	56
2	0.019	0.111	5.2	0.4	0.78	0.003	0.002	0.16	0.42	0.09	58
3	0.020	0.112	5.0	0.4	0.78	0.003	0.002	0.15	0.45	0.09	55
4	0.019	0.112	5.2	0.4	0.78	0.003	0.002	0.16	0.42	0.09	58
5	0.019	0.110	5.2	0.4	0.78	0.003	0.002	0.16	0.43	0.09	57
6	0.020	0.109	5.0	0.4	0.78	0.003	0.002	0.15	0.44	0.09	56
Media	0.019	0.111	5.1	0.4	0.78	0.003	0.002	0.16	0.43	0.09	57
Desviación estándar	0.000	0.001	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.01	0.01	0.00	1
CV %	1.38	1.15	2.00	1.67	0.00	1.21	1.57	3.92	2.17	1.52	1.66

C. Menor: Conjugado menor, C. Mayor: Conjugado Mayor

CV: Coeficiente de Variación.

Anexo VIII: Eficiencia del Salto Hidráulico con pendiente variable (0, 1%, 2%)

