

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**“INFLUENCIA DE VERTEDEROS DEL TIPO ESCALONADO PARA MEJORAR
LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA CONSIDERANDO VARIACIÓN DE LA
LONGITUD DE HUELLA CON CAUDAL CONSTANTE”**

Línea de Investigación:

Hidráulica

AUTORES:

Br. QUISPE LOZANO, JESÚS ENRIQUE

Br. VÁSQUEZ MANANITA, ELAR EDUARDO

ASESOR:

Ms. ING. NARVÁEZ ARANDA, RICARDO ANDRÉS

TRUJILLO, PERÚ

2019

Fecha de sustentación: 14/12/2019

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**“INFLUENCIA DE VERTEDEROS DEL TIPO ESCALONADO PARA MEJORAR
LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA CONSIDERANDO VARIACIÓN DE LA
LONGITUD DE HUELLA CON CAUDAL CONSTANTE”**

Línea de Investigación:

Hidráulica

AUTORES:

Br. QUISPE LOZANO, JESÚS ENRIQUE

Br. VÁSQUEZ MANANITA, ELAR EDUARDO

ASESOR:

Ms. ING. NARVÁEZ ARANDA, RICARDO ANDRÉS

TRUJILLO, PERÚ

2019

Fecha de sustentación: 14/12/2019

Aprobación del jurado

Tesis: "INFLUENCIA DE VERTEDEROS DEL TIPO ESCALONADO PARA MEJORAR LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA CONSIDERANDO VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE HUELLA CON CAUDAL CONSTANTE"

AUTORES:

Br. QUISPE LOZANO, JESÚS ENRIQUE

Br. VÁSQUEZ MANANITA, ELAR EDUARDO

Aprobado por:

Dr. Guillermo Juan Cabanillas Quiroz
Presidente
CIP:17902

Ms. José Luis Serrano Hernández
Secretario
CIP:54464

Dr. Luján Silva Enrique Francisco
Vocal
CIP:54460

Ms. Ricardo Andrés Narváez Aranda
Asesor
CIP: 58776

Dedicatoria

Dedico esta tesis en primer lugar a Dios por darme el regalo de la vida y bendecirme con la familia que tengo, a mis padres por su apoyo, por el esfuerzo y sacrificio que hicieron en su vida por darme lo mejor de ellos y enseñarme el valor del esfuerzo y trabajo, que gracias a su ejemplo soy un hombre de bien que lucha por alcanzar sus sueños y metas.

A mis hermanos que siempre me apoyaron y animaron a seguir adelante, que con sus palabras me transmitían sus sentimientos, el cariño y orgullo que sienten hacia mí, y también a mi abuelito, quien quise que también me viera alcanzar uno de mis sueños pero que hoy está en el cielo.

JESÚS ENRIQUE QUISPE LOZANO

Dedico esta tesis a Dios por bendecirme cada día, a mis padres por su constante y desinteresado apoyo durante todo este tiempo, y a mis hermanos que siempre me aconsejaron en situaciones complicadas.

ELAR EDUARDO VÁSQUEZ MANANITA

Agradecimientos

Agradecemos en primer lugar a nuestras familias por su apoyo incondicional, a nuestro asesor Ms. Ing. Ricardo Narváez Aranda, quien nos ayudó a realizar el presente estudio, transmitiéndonos algunos de sus conocimientos y dando las pautas necesarias para el desarrollo de nuestra tesis.

A los distintos ingenieros que durante la carrera nos transmitieron sus conocimientos, experiencias, consejos y motivaron a seguir adelante en el camino de alcanzar nuestras metas. A la Universidad Privada Antenor Orrego, nuestra alma mater que nos brindó las herramientas necesarias durante nuestros estudios de pregrado. Y por último agradecer a todas aquellas personas que nos apoyaron de distintas formas y así poder realizar nuestra investigación.

Los Autores.

Resumen

La presente tesis tuvo como objetivo principal realizar la siguiente investigación sobre la influencia de vertederos del tipo escalonado para mejorar la disipación de energía considerando variación de la longitud de huella con caudal constante., para realizar esta investigación se construyó 02 prototipos a escala de vertederos escalonados con diferente longitud de huella, con igual altura de contra huella y misma cantidad de escalones.

El procedimiento que se siguió para la toma de datos consistió en dividir cada huella en progresivas de 2.5 cm, y en cada punto medir la altura del tirante y a si mismo medir la longitud del salto hidráulico en cada escalón y de esta forma poder graficar el perfil del flujo del agua en un vertedero del tipo escalonado con un caudal constante, el cual se midió mediante ensayos repetitivos basado en la ecuación de continuidad, $Q= V \times A$. De esta forma se pudo observar los resaltos hidráulicos e identificar el tipo de flujo presente en cada escalón del vertedero.

En la simulación numérica mediante elementos finitos usando el software Flow 3D, se simuló las condiciones físicas e hidráulicas del ensayo experimental, el cual nos muestra la similitud que existe en el flujo del agua durante el recorrido del vertedero escalonado, obteniendo un perfil hidráulico similar.

Los resultados de los ensayos realizados de forma analítica y experimenta comprueban que existe una influencia de los vertederos del tipo escalonado en la resistencia al flujo y en la disipación de energía el cual se puede mejorar cambiando ciertas condiciones de diseño como la longitud de huella y altura de contra huella.

Por lo tanto se concluye que los vertederos de tipo escalonado influyen de manera positiva en la resistencia al flujo y disipación de energía en obras de excedencia teniendo en cuenta las condiciones físicas y criterios de diseño.

Abstract

The main objective of this thesis was to carry out the following investigation on the influence of stepped landfills of the staggered type to improve the dissipation of energy considered variation of the length of the footprint with constant flow. To carry out this investigation, 02 scale prototypes of stepped dumps with different footprint lengths were built, with the same height as the counter's footprint and the same number of steps.

The procedure that was followed for the data collection consisted of dividing each footprint into 2.5 cm progressives, and at each point measuring the height of the stay and measuring the length of the hydraulic jump in each step and thus be able to graph the profile of the water flow in a landfill of the step type with a constant flow rate, which was measured by repetitive tests based on the continuity equation, $Q = V \times A$. In this way it was possible to observe the hydraulic shoulders and identify the type of flow present at each step of the landfill.

In the numerical simulation using finite elements Flow 3D software, simulated the physical and hydraulic conditions of the experimental test, which shows the similarity that exists in the flow of water during the route of the stepped landfill, obtaining a similar hydraulic profile.

The results of the tests carried out analytically and experimentally prove that there is an influence of landfills of the step type in the resistance to flow and in the dissipation of energy which can be improved by changing certain design conditions such as footprint and height. of against footprint.

Therefore, it is concluded that step-type landfills have a positive influence on the resistance to flow and dissipation of energy in works of exceedance, taking into account the physical conditions and design test.

Presentación

SEÑORES MIEMBROS DEL JURADO:

Dando cumplimiento al Reglamento de Grados y títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego, es grato poner a su disposición la presente Tesis titulada: **“INFLUENCIA DE VERTEDEROS DEL TIPO ESCALONADO PARA MEJORAR LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA CONSIDERANDO VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE HUELLA CON CAUDAL CONSTANTE”**, con el propósito de obtener nuestro Título Profesional de Ingeniero Civil.

Los Autores.

Índice

Dedicatoria.....	v
Agradecimientos	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
Presentación	ix
Índice	x
Índice de gráficos.....	xiii
Índice de tablas.....	xvi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problema de Investigación	2
1.1.1. Descripción de la Realidad Problemática.....	2
1.1.2. Formulación del Problema	3
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. Justificación del Estudio	4
II. MARCO DE REFERENCIA.....	5
2.1. Antecedentes del Estudio	6
2.2. Marco Teórico.....	13
2.2.1. Vertedero.	13
2.2.2. Partes de un Vertedero.	13
2.3. Marco Conceptual.....	32
2.3.1. Vertederos Escalonados	32
2.3.2. Tipos de flujo.....	32
2.3.3. Disipación de Energía	41

2.3.4.	Aireación	43
2.3.5.	Avenida de Diseño	44
2.3.6.	Resistencia al flujo	44
2.3.7.	Modelación Física Reducida	44
2.3.8.	Modelación numérica	47
2.4.	Sistema de Hipótesis	49
2.4.1.	Hipótesis	49
2.4.2.	Variables	49
III.	METODOLOGÍA	50
3.1.	Tipo y Nivel de Investigación	51
3.1.1.	Tipo de Investigación	51
3.1.2.	Nivel de Investigación	51
3.2.	Población y Muestra	51
3.2.1.	Población	51
3.2.2.	Muestra	51
3.3.	Diseño de Investigación.....	51
3.4.	Técnicas e Instrumentos de Investigación.....	52
3.5.	Procesamiento y Análisis de Datos	52
IV.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	53
4.1.	Modelación Física (Experimental).....	54
4.1.1.	Definición de prototipos.....	54
4.1.2.	Cálculo de Caudal.....	56
4.1.3.	Medición de Tirantes.....	57
4.1.4.	Cálculo de Velocidades.....	62
4.1.5.	Gráfico de Perfiles de Flujo	66
4.6.	Disipación de Energía en Prototipos.....	79
4.7.	Curva de Energía Específica en Prototipos	80

4.2.	Modelación Numérica (Analítica)	81
4.2.1.	Construcción de la Geometría del Vertedero Escalonado	81
4.2.2.	Mallado de Estructura	83
4.2.3.	Condiciones de Frontera	86
4.2.4.	Condiciones iniciales.....	87
4.2.5.	Simulación.....	87
4.2.6.	Resultados de modelación Numérico.....	88
4.2.7.	Disipación de energía en modelos en software.....	94
4.2.8.	Modelación del vertedero en estudio con diferente escala y ancho. 96	
V.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	102
5.1.	Tipo de Flujo	103
5.2.	Disipación de energía	104
VI.	CONCLUSIONES.....	105
VII.	RECOMENDACIONES	108
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	110
	ANEXOS	113

Índice de gráficos

Figura 1. Planta típica de un vertedero de demasía.....	14
Figura 2. Perfil típico de un vertedero de demasías.....	14
Figura 3. Agujas instaladas en la presa Marte R. Gómez, Tamaulipas, México	16
Figura 4. Compuerta deslizante de la presa Abelardo L. Rodríguez, Baja California, México.....	17
Figura 5. Perfil típico de una compuerta radial.....	18
Figura 6. Elevación y planta de una sección de control de umbral ancho.....	19
Figura 7. Sección de control con perfil practico sin vacío	20
Figura 8. Vista en planta de una transición	22
Figura 9. Perfiles de los regímenes de circulación del flujo en una transición ..	23
Figura 10. Perfil de un conducto de descarga.....	23
Figura 11. Perfil y vista de operación del vertedero con salto de esquí de la presa Ralco, Biobío, Chile.....	24
Figura 12. Vista isométrica y funcionamiento de una cubeta tipo USBR dentada	26
Figura 1213. Vista isométrica y funcionamiento de una cubeta tipo USBR lisa	26
Figura 14. Perfil de una cubeta lisa tipo Lievi-Chertousov	27
Figura 15. Localización de los accesorios en un tanque amortiguador	27
Figura 16. Planta de un tanque rectangular tipo SAF	29
Figura 17. Vista de una sección y elevación de un tanque rectangular tipo SAF	29
Figura 18. Vista isométrica y elevación de un tanque rectangular tipo USBR (I)	30
Figura 19. Vista isométrica y elevación de un tanque rectangular tipo USBR (II)	30
Figura 20. Vista isométrica y elevación de un tanque rectangular tipo USBR (III)	31
Figura 21. Tipos de flujo escalón en escalón	33
Figura 22. Flujo escalón a escalón aislado con resalto hidráulico totalmente desarrollado.....	34

Figura 23. Flujo escalón a escalón aislado con resalto hidráulico parcialmente desarrollado.....	34
Figura 24. Flujo en caída libre, representación de las variables características, adaptado de Chanson, 2002, p 46	36
Figura 25. Flujo escalón a escalón parcial, adaptado de Canson, 2002, p 46. .	36
Figura 26. Regiones de flujo a lo largo de la rápida en flujos de superficie.	38
Figura 27. Flujo rasante en aliviaderos escalonados en presas de HCR.....	39
Figura 28. División de flujos presentes en estructuras escalonadas.....	40
Figura 29. Flujo de transición.....	41
Figura 30. Relación de Energía remanente al pie de rápida sobre Energía total. Flujo en láminas	42
Figura 31. Valores del coeficiente de fricción en función de la rugosidad y el tirante.	43
Figura 32. Proyección lineal del sistema modelo - prototipo	45
Figura 33. Prototipo 01, escalón de 0.175x0.10m.....	54
Figura 34. Prototipo 02, escalón de 0.15x0.10m.....	55
Figura 35. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 01 Prototipo 01	67
Figura 36. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 02 Prototipo 01	67
Figura 37. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 03 Prototipo 01	68
Figura 38. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 04 Prototipo 01	68
Figura 39. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 05 Prototipo 01	69
Figura 40. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 06 Prototipo 01	69
Figura 41. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 07 Prototipo 01	70
Figura 42. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 08 Prototipo 01	70
Figura 43. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 09 Prototipo 01	71
Figura 44. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 10 Prototipo 01	71
Figura 45. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 11 Prototipo 01	72
Figura 46. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 12 Prototipo 01	72
Figura 47. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 01 Prototipo 02	73
Figura 48. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 02 Prototipo 02	73
Figura 49. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 03 Prototipo 02	74
Figura 50. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 04 Prototipo 02	74
Figura 51. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 05 Prototipo 02	75
Figura 52. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 06 Prototipo 02	75

Figura 53. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 07 Prototipo 02	76
Figura 54. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 08 Prototipo 02	76
Figura 55. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 09 Prototipo 02	77
Figura 56. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 10 Prototipo 02	77
Figura 57. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 11 Prototipo 02	78
Figura 58. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 12 Prototipo 02	78
Figura 59. Curva de Energía Prototipo 01	80
Figura 60. Curva de Energía Prototipo 02.....	81
Figura 61. Modelo a escala real de Prototipo 01, escalón de 3.50x2.00m	82
Figura 62. Modelo a escala real de Prototipo 02, escalón de 3.00x2.00m	83
Figura 63. MP01-3.50x2.00x2.00 m.	84
Figura 64. MP01-3.00x2.00x2.00 m.	84
Figura 65. MP02-3.00x2.00x2.00 m.	85
Figura 66. MP02-3.00x2.00x2.00 m.	85
Figura 67. MP01-3.50x2.00x2.00 m.	86
Figura 68. MP02-3.00x2.00x2.00 m.	86
Figura 69. MP01-3.50x2.00x2.00 m.	88
Figura 70. MP02-3.00x2.00x2.00 m.	88
Figura 71. Vista de Perfil del vertedero escalonado MP-01 con presiones para un caudal de 4.50 m ³ /s.	89
Figura 72. Vista de Perfil en 3D del vertedero escalonado MP-01 con presiones para un caudal de 4.50 m ³ /s.	89
Figura 73. Vista de Perfil en del vertedero escalonado MP-02 con presiones para un caudal de 4.50 m ³ /s.	90
Figura 74. Vista de Perfil en 3D del vertedero escalonado MP-02 con presiones para un caudal de 4.50 m ³ /s.	90
Figura 75. Curva de Energía MP-02	95
Figura 76. Curva de Energía modelo a escala real	101
Figura 77. Comportamiento del Fluido en Modelo Experimental con un caudal de 4.5 m ³ /s MP-02	103

Índice de tablas

Tabla 1: Medición de Caudales.....	57
Tabla 2. Medición de Tirantes - Prototipo 01.....	58
Tabla 3. Medición de Tirantes - Prototipo 02.....	60
Tabla 4. Cálculo de Velocidad - Prototipo 01	62
Tabla 5. Cálculo de Velocidad - Prototipo 02	64
Tabla 6. Pérdida de Energía - Prototipo 01	79
Tabla 7. Pérdida de Energía - Prototipo 02.....	79
Tabla 8. Velocidades MP-01	91
Tabla 9. Velocidades MP-02	92
Tabla 10. Disipación de Energía en MP-01	94
Tabla 11. Disipación de Energía en MP-02.....	95
Tabla 12. Vertedero Escala Real	99
Tabla 13. Disipación de Energía en Modelo a escala real	100

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de Investigación

1.1.1. Descripción de la Realidad Problemática

En Obras de excedencia hidráulica lo que se quiere es aumentar la resistencia al flujo e incrementar la disipación de energía en su descenso hacia aguas abajo, y a su vez reducir la cavitación de las estructuras durante este proceso. Este problema se presenta en vertederos de excedencia, bocatomas, estructuras de caída, etc.

En presas los vertederos están conformados por: canal de acceso o aproximación, sección de control o vertedora, Transición, Rápida o conducto de descarga, Estructuras terminales o disipadoras de energía y Canal de salida. En este tipo de vertederos la disipación de energía se maneja ya en la parte última de la estructura y no desde el inicio de salida de agua en la sección de control o vertedora si no ya casi al final de ella.

La estructura disipadora de energía es una parte importante de la obra de excedencia que tiene como objetivo disipar la energía cinética que el agua adquiere en su proceso de caída desde que sale de la sección de control y pasa por la transición y rápida, en donde el flujo del agua se incrementa sin tener mucha resistencia.

Para mejorar el proceso de resistencia al flujo y la disipación de energía en los vertederos, se propone la posibilidad de usar vertederos del tipo escalonado, los cuales aprovechando la geometría del vertedero desde el inicio de la transición hasta el término de la rápida, dándole una forma escalonada en lugar de la forma lisa, para mejorar la resistencia al flujo y así mismo disipar significativamente la energía del agua que llega aguas abajo, de esta forma reduciendo el área de la estructura de disipadora de energía que por lo general son tanques amortiguadores o colchones disipadores.

El funcionamiento de los vertederos del tipo escalonado en obras de excedencia como presas, ha dado lugar a que varios investigadores presenten modelos

bidimensionales y tridimensionales que se aplican al diseño de vertederos del tipo escalonado, dejando el interés de aprender sobre el comportamiento hidráulico de estas estructuras y comprobar de qué manera influye en la mejora de la resistencia la flujo y disipación de energía aprovechando su geometría escalonada.

1.1.2. Formulación del Problema

¿De qué forma los vertederos de tipo escalonado con variante en la longitud de su huella influyen en la mejora de la disipación de energía para un mismo caudal?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Comprobar analíticamente y experimentalmente la disipación de energía en vertederos del tipo escalonado variando su longitud de huella.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Diseñar 02 prototipos de vertederos del tipo escalonado con variación de las dimensiones en sus huellas para un mismo caudal.
- Realizar la modelación numérica del comportamiento hidráulico de 02 prototipos de vertederos del tipo escalonado usando diferente caudal en el software Flow 3D.
- Construir un equipo experimental desmontable para instalar los 02 prototipos de vertederos del tipo escalonado, para su observación y análisis.
- Realizar ensayos experimentales para:
 - Determinar el tipo de flujo que se desarrolla.
 - Calcular las velocidades del flujo, en relación a los tirantes obtenidos en los ensayos del prototipo.
- Observar, registrar y calcular las pérdidas de energía del fluido en el prototipo.

- Comparar los resultados de la velocidad del flujo y pérdida de energía obtenidos mediante la modelación física experimental y la modelación numérica.

1.3. Justificación del Estudio

El comportamiento del flujo sobre vertederos escalonados ha sido escasamente estudiado, por lo que sus propiedades físicas no han sido totalmente comprendidas a la fecha. La naturaleza altamente turbulenta y el gran contenido de aire en estos flujos tampoco han permitido el desarrollo de un modelo analítico confiable para predecir sus características, por lo que el análisis de dicho flujo debe hacerse por medio de un estudio experimental, sabiendo esto seleccionamos y desarrollaremos 02 modelos a escala según las leyes de semejanza de vertederos del tipo escalonado, donde realizaremos un determinado número de ensayos para comprobar los resultados obtenidos de la modelación numérica realizado en el software Flow 3D, es por ello que nos vemos en la necesidad de desarrollar esta tesis con el fin de que exista un estudio a profundidad sobre el tema y poder contribuir con las demás investigaciones.

II. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes del Estudio

Flores, W. (2015). Comportamiento del flujo en vertedores escalonados con descarga convergente (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Morelos, México.

Conclusiones:

- Debido a las condiciones físicas del sitio, la geometría del tanque amortiguador queda limitada para disipar la energía para lograr un funcionamiento hidráulico adecuado.
- Por lo anterior, se requería encontrar un mecanismo para hacer más eficiente la capacidad del tanque, ya sea disipando energía en el canal de descarga o bien colocando dispositivos dentro del tanque amortiguador.
- El estudio muestra la dificultad de disipar energía en el tanque amortiguador debido a la concentración del flujo, lo deseable como primera alternativa, sería la redistribución del flujo dentro del tanque. Esto se logró básicamente con estructuras colocadas en el fondo del tanque, lo cual complica el diseño estructural de la losa del tanque de tal forma que podría ser necesario el incremento en su espesor y por lo tanto el incremento en la excavación llegando incluso a capas geológicas menos competentes.
- La segunda alternativa es reducir el gasto antes de que alcance el final de la rampa y los deflectores colocados sobre el bloque de concreto, esto se logró colocando seis deflectores en el tramo final del de la rampa escalonada. También implica la revisión estructural de la misma rampa para tomar las solicitaciones mecánicas ocasionadas por el peso propio de la estructura y el flujo.
- El uso de represas ayuda en la disipación de energía y la disminución de la velocidad dentro del recinto creado por ésta, sin embargo, la aceleración del

flujo aguas abajo de la represa es alta, mayor a la requerida, debido a la caída del flujo desde la cresta de la represa, lo cual pone en riesgo a la represa misma por la socavación al pie.

- El modelo físico a escala reducida utilizado en el estudio se construyó en acrílico de acuerdo a la ley de similitud de Froude, con las siguientes escalas:
 - Escala de líneas verticales y horizontales para el: $EL = 1:50$
 - Escala de velocidades; $E_v = EL^{1/2} = 1:7.071$
 - Escala de gastos; $E_Q = EL^{5/2} = 1:17,677.67$
- Los ensayos de evaluación se iniciaron con el nuevo arreglo del proyecto original.
- Durante los ensayos se comprobó que los datos que forman parte del contrazud presentan poca influencia en la disipación de la energía.
- Se evaluaron 20 arreglos que conforman las alternativas mencionadas en el capítulo 3.
- En general, el encajonamiento del flujo dentro de los muros del canal de descarga se apreció adecuado.
- Dos arreglos, correspondientes a las series 12 y 20, formaron un funcionamiento hidráulico adecuado del flujo.
- Ambas alternativas resuelven aceptablemente el problema de disipación de energía. La primera requiere de un número considerable de estructuras distribuidas sobre la rampa escalonada. La segunda consiste principalmente en relativamente pocos elementos, seis deflectores, pero de tamaño mucho mayor.
- El arreglo de la serie 12, básicamente consistió en disipar energía en la segunda mitad del canal de descarga, mediante piezas del tipo 1*, 2* y 3*.

Este arreglo consistió en colocar piezas de dimensiones recomendadas usualmente en los manuales especializados en el tema, distribuidos simétricamente en el canal de descarga. Se midieron presiones en las piezas, de acuerdo a la Ilustración 3.48, obteniéndose magnitudes mostradas en la Ilustración 3.49, de 45.593 mca para la posición 15 correspondiente a la cara frontal de la pieza central tipo 3*. La presión mínima es de magnitud negativa, -1.233 mca.

- El arreglo 20, consistió en colocar deflectores en el tercio final del canal, haciendo despegar una parte importante del flujo, esto induce una fuerte aireación y disipación de energía, además, los deflectores colocados sobre el bloque hacen despegar otra parte del flujo originando el choque de ambos chorros antes de caer al tanque. Se midieron presiones en el fondo del tanque amortiguador, de acuerdo a la Ilustración 3.56, obteniéndose las magnitudes mostradas en la Ilustración 3.57. La presión máxima se ubica al centro del tanque y es de 44.619 mca, mientras que en el resto del fondo varían entre 21 y 30 mca.
- En el arreglo 20, las magnitudes que se presentan corresponden condiciones hidráulicas aceptables.
- Con la finalidad de determinar los esfuerzos en las estructuras se midieron presiones y velocidades en puntos y secciones estratégicas.
- A pesar de la simetría geométrica del vertedor, se ha observado que el flujo ingresa asimétricamente, presentando mayor concentración en la margen derecha, es por ello que la instrumentación se ubicó en este lado, considerando que es el caso más desfavorable. La simetría permite interpolar o bien considerar los valores máximos obtenidos.
- En general, las presiones negativas observadas son mayores a la presión de vaporización del agua, además estas se presentan cerca de algún borde

y tirantes pequeños, por donde se presenta admisión de aire, por lo que se puede omitir la colocación de aireadores.

- Las presiones en los muros de encauzamiento resultaron menores que las cargas hidrostáticas producidas por la profundidad del perfil de la superficie libre del agua pegada a los muros, por lo que se recomienda utilizar estos para su diseño estructural.
- Dada la cercanía y las diferencias significativas de las magnitudes, es recomendable que se incluyan los esfuerzos conjuntos en el diseño estructural.
- Las velocidades máximas en el canal de descarga que se presenta en los deflectores ubicados sobre los escalones en el último tercio del canal de descarga, son del orden de 30 m/s.
- Las velocidades a la salida del tanque amortiguador, a pesar de ser considerablemente altas, corresponden al perfil del flujo que se tendría en condiciones naturales para los gastos evaluados. Por lo que se requiere proteger un tramo del río aguas abajo para evitar la socavación regresiva que dañe las estructuras finales del tanque.
- Con respecto a la modelación matemática en FLOW 3D se recomienda ejecutar la simulación con una malla más fina, con inclusión de aire, afinamiento de la geometría, así como también probar con otros modelos de cálculo, pues es una herramienta valiosa que debe ser explotada en el futuro cercano.
- Los resultados obtenidos con el modelo numérico fueron aceptables ya que los resultados obtenidos de presiones muestran un error en la en la rápida del 7% con respecto al modelo numérico, y un error en el tanque amortiguador del 3%.

- Se compararon los resultados de las velocidades de la rápida del vertedor en varias posiciones y el error que se calculó del modelo numérico con respecto al modelo físico fue de 3%.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2011). Simulación física y matemática del flujo en vertedores escalonados. Recuperado de <http://repositorio.imta.mx/>

Conclusiones:

- Una vez analizados los resultados de las simulaciones mediante Flow 3D y compararlos con datos obtenidos en los modelos físicos de laboratorio y los reportados en la literatura, se puede concluir que la modelación numérica con CFD es una herramienta robusta para para revisar el funcionamiento hidráulico de grandes obras con vertedores escalonados, como es el caso de la Presa El Zapotillo. Además, que se pueden generar simulaciones para contribuir al estado del arte en lo relativo a vertedores escalonados. Los tres tipos de flujo en vertedores escalonados: escalón por escalón, de transición y flujo rasante, se lograron reproducir adecuadamente.
- Uno de los objetivos de presente trabajo fue el de analizar las obras hidráulicas en sus dimensiones de prototipo. Aunque otros autores ya han realizado simulaciones numéricas de vertedores escalonados, las dos que se desarrollaron en este trabajo, tienen del orden de dos y cuatro veces el número de escalones (Bombardelli et al, 2010). Lo cual representa un reto en términos de inicialización del campo de flujo en cuestiones de la solución numérica.
- En el caso de la Presa Rendwick, tanto la forma de la superficie libre del agua sobre la cresta del vertedor fue representada adecuadamente, así como también el punto de inserción de aire. Desafortunadamente, no se contaron con valores de velocidades, presiones y niveles, para llevar a

cabo una comparación más a detalle. Sin embargo, los resultados concuerdan cualitativamente con lo reportado por Hunt et al (2008).

- Sin duda alguna, la parte más interesante de este trabajo fue la caracterización hidrodinámica de la Presa El Zapotillo, tanto bidimensional como tridimensional. En la simulación numérica bidimensional los valores de velocidad tuvieron gran semejanza con los valores obtenidos en el modelo físico de laboratorio (Salgado, 2011).
- Los datos obtenidos con la modelación numérica concordaron con los gastos teóricos.
- Probablemente uno de los aspectos más contundentes, es que con la modelación numérica se pudo obtener valores de velocidad y presión en todos los escalones, y con ello se evaluó el número de Thoma y por lo tanto se identificaron los riesgos nulos por cavitación. Dichos valores, son prácticamente imposibles obtenerlos en el laboratorio debido a la escala del modelo y al equipo de medición disponible. Por otra parte, de acuerdo con los resultados de la distribución de presiones (Figura 2.25), puede observarse que en los dos escalones con dimensiones mayores, estarán sometidos a fuertes presiones cerca de la arista de su platilla, por lo que conviene revisarlos estructuralmente o discernir el uso de ellos. Esto porque están considerados para la instalación de aireadores, pero como puede observar tanto en la modelación numérica como en el modelo físico de laboratorio, la intrusión de aire se da naturalmente justo debajo de las pilas (super sic).
- En la modelación tridimensional de la Presa El Zapotillo, se logró reproducir de manera satisfactoria la intrusión de aire. Los resultados obtenidos concuerdan con las observaciones de laboratorio, y el gasto difiere en un 7% del gasto teórico. En estas simulaciones queda claro que no se puede concluir únicamente con una aproximación bidimensional, ya que la franja central se comporta de manera distinta a las franjas laterales. Tanto en la modelación física como en la numérica se observaron ondas

cruzadas, las cuales tienen una alta influencia a partir de los 2/3 de la rápida y sobre todo en el funcionamiento del tanque de amortiguamiento.

- La forma de abanico del vertedor implicó una elección cuidadosa en la distribución del tamaño de las celdas, aunque son hexaedros regulares se debe tener cuidado al elegir los tamaños. Los resultados demuestran que no es obligatoria la implementación de mallas no estructuradas para geometrías con curvatura tal y como lo expresan muchos autores.
- Las simulaciones tridimensionales se llevaron a cabo en computadoras de 8 procesadores a 3.8 Ghz y 8Gb de memoria RAM. En las cuales 40 segundos de tiempo prototipo requirieron de 700 hr de tiempo de cómputo. Para llevar una revisión adecuada para evaluar la estructura para condiciones de diseño, se requeriría del orden de ocho veces más el número de celdas, de aquí la necesidad de contar con mejor equipo de cómputo.

Universidad de Buenos Aires. (2014). Vertederos escalonados, abordaje teórico, experimental y numérico. Recuperado de <http://www.ina.gob.ar/>

Conclusiones:

- La disipación de energía sobre las rápidas escalonadas resulta evidentemente superior a las rápidas lisas, y esto presenta una ventaja indiscutible para estos tipos de estructuras, donde el objetivo es erogar los caudales durante las crecidas garantizando la seguridad estructural de la obra de embalse.
- A través del modelo numérico se pudo representar los tipos de flujo característico en estas estructuras: el flujo en láminas y el flujo en superficie, obteniéndose un ajuste aceptable con la curva de descarga teórica y del modelo físico, teniendo en cuenta que se trata de un modelo bidimensional.

- En cuanto a la disipación de energía obtenida a través de las simulaciones numéricas también se logró un buen ajuste sobre los datos de modelación física, aunque con valores algo superiores.
- En el futuro se analizarán los efectos de cavitación en las rápidas para estudiar la relación entre los índices de cavitación y las configuraciones geométricas y de descarga sobre el vertedero.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Vertedero.

Novak, Moffat y Nalluri (2001) en relación a los vertederos, señalan lo siguiente: “Los vertederos son básicamente estructuras de una presa que garantizan el paso seguro de las crecientes desde el embalse al tramo del río aguas abajo” (p.155).

Arreguín & Alcocer (2011) acerca de los vertederos, definen lo siguiente: “Las obras de excedencia o vertederos de demasías se construyen con objeto de dar paso a los volúmenes de agua que no pueden retenerse en el vaso de una presa de almacenamiento para su aprovechamiento” (p.01).

2.2.2. Partes de un Vertedero.

- Canal de acceso o aproximación.
- Sección de control o vertedora.
- Transición.
- Rápida o conducto de descarga.
- Estructuras terminales o disipadoras de energía.

➤ Canal de salida.

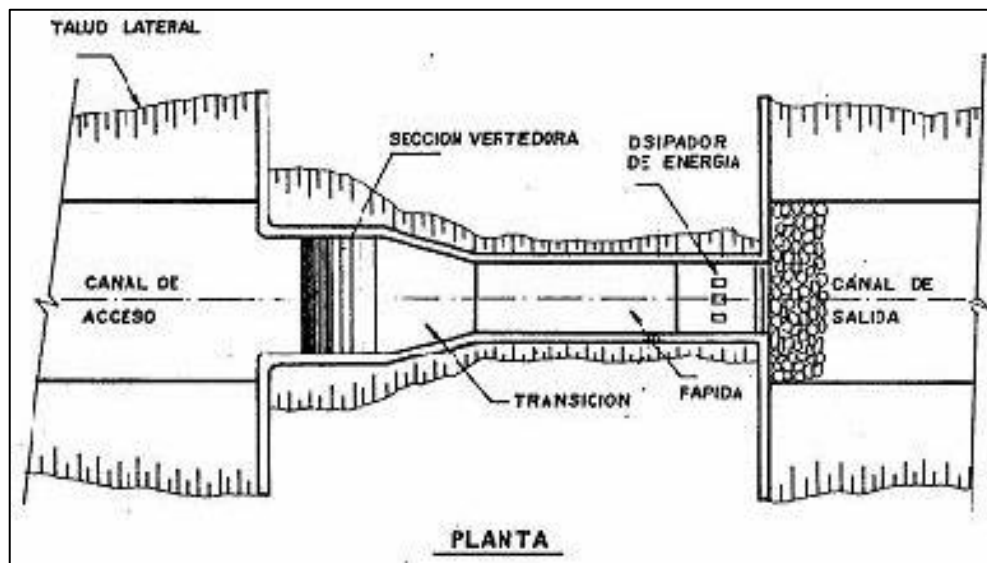


Figura 1. Planta típica de un vertedero de demasía

Nota. Recuperado de “Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas”, Alegret, E. & Pardo, R., 2005, p.03, La Habana, Cuba.

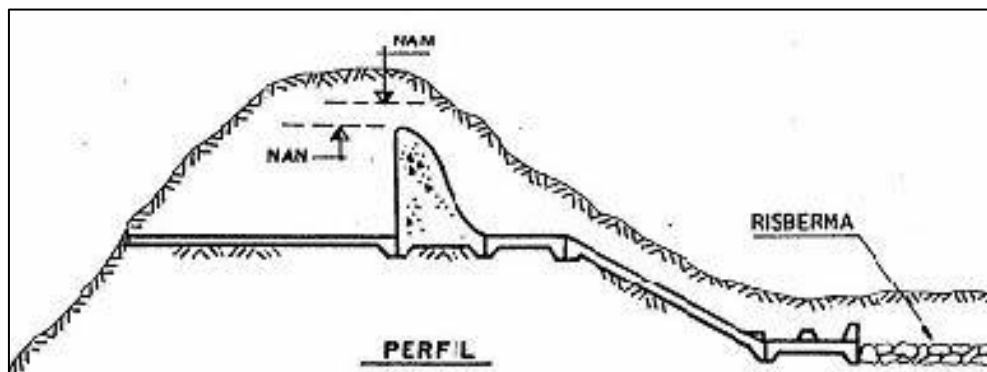


Figura 2. Perfil típico de un vertedero de demasías

Nota. Recuperado de “Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas”, Alegret, E. & Pardo, R., 2005, p.03, La Habana, Cuba.

2.2.2.1. Canal de acceso o de aproximación.

El canal de acceso o de aproximación es el elemento inicial de un vertedero, el cual permite el ingreso del agua a esta estructura. Alegret & Pardo (2005) señalan: “Este canal debe cumplir el requerimiento de conducir el agua hasta la sección vertedora en condiciones tranquilas y normal a su longitud, evitando zonas de turbulencia que afecten la uniformidad de trabajo de la estructura” (p.10). Con el

objetivo de disponer la mayor carga total para el vertimiento, este canal debe producir la mínima pérdida de carga posible.

El canal de acceso debe cumplir para su diseño con los siguientes requisitos:

- Debe ser diseñado y ubicado de forma tal que las velocidades no afecten el talud de la cortina.
- Las velocidades deben ser suficientemente pequeñas para que las pérdidas y erosión sean las menores posibles. Estas no serán mayores de 3.00 m/s.
- La entrada de agua al canal debe ser suave o gradual, con vista a evitar vórtices y remolinos; las curvas y transiciones también deben ser graduales.
- Las líneas de corriente tienen que ser normales a la sección vertedora para lograr una distribución uniforme de gastos específicos.

2.2.2.2. Sección de control o vertedora.

Alegret & Pardo (2005) señalan lo siguiente: “Uno de los principales componentes de un aliviadero, lo constituye la estructura de control o sección vertedora porque regula y gobierna las descargas del vaso cuando en éste se alcanzan niveles mayores a los ya fijados” (p.27). Las crestas en las secciones vertedoras pueden ser con control o libres.

Dentro de los tipos más comunes de crestas con control están:

- Agujas.
- Compuertas deslizantes.
- Compuertas radiales.

2.2.2.2.1. Agujas.

Arreguín & Alcocer (2011) en relación a las agujas afirman: “Son un conjunto de vigas de madera que se colocan sobre la cresta del vertedor con objeto de

incrementar la capacidad de almacenamiento de la presa, se apoyan en postes verticales anclados sobre la cresta” (p.13). Estas agujas deben ser retiradas cuando es necesario incrementar la descarga de la presa.



Figura 3. Agujas instaladas en la presa Marte R. Gómez, Tamaulipas, México

Nota. Recuperado de “Diseño Hidráulico de Vertedores”, Arreguín, F. & Alcocer, V., 2011, p.13, Morelos, México: IMTA.

2.2.2.2. Compuertas deslizantes.

Son estructuras metálicas, generalmente rectangulares de acero colado que se deslizan sobre guías formadas por perfiles estructurales tipo canal apoyadas sobre las pilas de los vertedores. Estas compuertas son accionadas mediante mecanismos elevadores a través de una flecha de acero cuando son pequeñas, (...). Cuando el tamaño de las compuertas es tal que su peso obliga al uso de equipos elevadores de gran potencia, es común montar ruedas en los cantos de las compuertas que corren sobre las guías. (Arreguín & Alcocer, 2011, p.15)



Figura 4. Compuerta deslizante de la presa Abelardo L. Rodríguez, Baja California, México

Nota. Recuperado de "Diseño Hidráulico de Vertedores", Arreguín, F. & Alcocer, V., 2011, p.16, Morelos, México: IMTA.

2.2.2.2.3. Compuertas radiales.

Las compuertas radiales están formadas por un sector de cilindro, generalmente de acero, apoyado en brazos radiales. La superficie cilíndrica concentra el empuje hidrostático, de tal manera que este pasa por los brazos hacia un perno de apoyo, lo cual reduce la cantidad de movimiento necesaria para elevar o bajar la compuerta. (Arreguín & Alcocer, 2011, p.15)

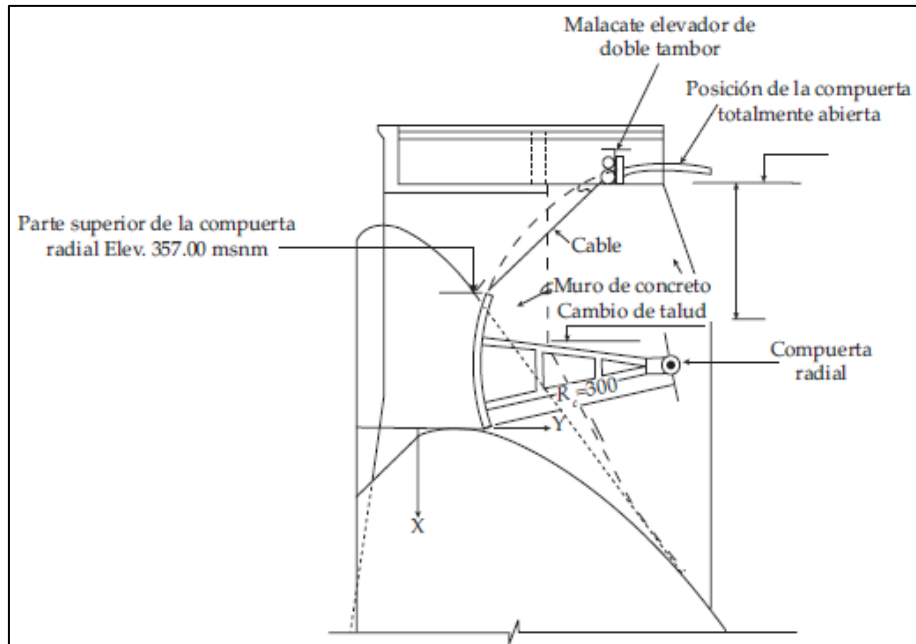


Figura 5. Perfil típico de una compuerta radial

Nota. Recuperado de "Diseño Hidráulico de Vertedores", Arreguín, F. & Alcocer, V., 2011, p.17, Morelos, México: IMTA.

Existen distintos tipos de secciones vertedoras libres, estas son:

- Poligonales (umbral ancho).
- De perfil practico sin vacío.
- De perfil practico con vacío.

a. Umbral ancho.

Un vertedor se considera de umbral ancho cuando entre el ancho del umbral (S) y la carga total o de diseño (H_0) sobre éste, cumple que: $2 < S/H_0 < 10$. Cuando esto ocurre, se considera que las pérdidas de carga a lo largo del umbral son

despreciables y que por estar en presencia de un tramo muy corto en él tiene lugar un movimiento gradualmente variado. (Alegret & Pardo, 2005, p.27)

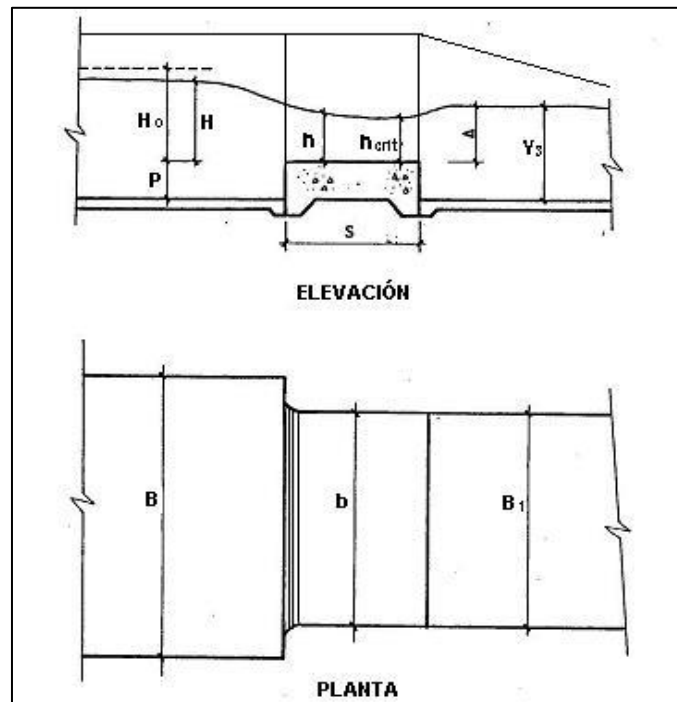


Figura 6. Elevación y planta de una sección de control de umbral ancho

Nota. Recuperado de "Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas", Alegret, E. & Pardo, R., 2005,

El cálculo de la capacidad de evacuación está estrechamente vinculado con las condiciones en que se realice el vertimiento, estas pueden ser: sin ahogo y sin contracción lateral, sin ahogo y con contracción lateral, y ahogado.

Los vertedores de umbral ancho se diferencian substancialmente de los otros vertedores en lo que al ahogo se refiere, pues éste solamente ocurre después que el nivel aguas abajo se eleva sobre el umbral por encima de un límite determinado. Este límite está definido por un valor relativo Δ/H_0 , donde el término Δ no es más que la sobre elevación del nivel del agua con respecto al umbral, y H_0 la carga total o de diseño existente. (Alegret & Pardo, 2005, p.28)

b. De perfil práctico sin vacío.

Cuando el espacio bajo el chorro que descarga libremente sobre un vertedor de pared delgada es rellenado con hormigón o cualquier otro tipo de material, se obtendrá el perfil del vertedor coincidiendo con la configuración de la parte inferior de la lámina o lo que comúnmente se conoce como perfil práctico sin vacío. (Alegret & Pardo, 2005, p.39)

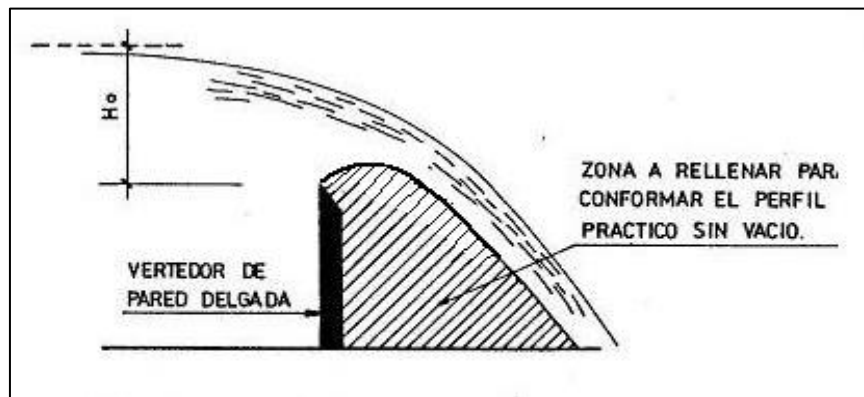


Figura 7. Sección de control con perfil práctico sin vacío

Nota. Recuperado de "Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas", Alegret, E. & Pardo, R., 2005, p.39, La Habana, Cuba.

La carga a partir de la cual se obtiene el perfil del vertedor es denominada carga perfilante H_{per} y en la mayoría de los casos se hace coincidir con la carga H_0 . Para el gasto calculado según la carga de diseño, la lámina vierte suavemente sin interferencia de la superficie vertedora y por ende el vertedor funciona con su máxima eficiencia. Si la carga es menor que la perfilante o de diseño, la lámina será soportada por el cimacio obteniéndose en estas circunstancias una presión, mayor que la que se alcanza en el caso de la lámina libre (presión relativa nula), y un remanso aguas arriba que produce una disminución de la eficiencia del vertedor; si por el contrario la carga es mayor que la perfilante o de diseño, la lámina tiende a separarse del perfil vertedor; pero si no existe ventilación por debajo de dicha lámina, se producirán presiones inferiores a la atmosférica o de vacío debajo de tal lámina, lo cual trae como efecto aumentar la eficiencia del vertedor. (Alegret & Pardo, 2005, p.39 y 40)

c. De perfil práctico con vacío.

Los vertedores de perfil práctico con vacío tienen su origen a diferencia de los perfiles prácticos sin vacío a partir de obtener una configuración del cimacio más angosta, de forma tal que no coincida con la parte inferior de la lámina libre que vierte sobre un vertedor de pared delgada aireada, pues de esta manera se crean las condiciones necesarias para la formación del vacío (presiones negativas) en el espacio que tiene lugar entre el chorro y el nuevo perfil del cimacio. (Alegret & Pardo, 2005, p.59)

Sin embargo, al proyectar este tipo de sección vertedora deberá tenerse en cuenta la posibilidad de ocurrencia de dos fenómenos que atentan contra la integridad el cimacio vertedor, uno de ellos es la cavitación y el otro la ruptura del vacío.

Arreguín & Alcocer (2011) con respecto a la cavitación señalan: “Es un fenómeno que consiste en la formación de cavidades llenas de vapor de agua dentro del flujo, esto sucede cuando se presentan presiones negativas iguales o menores que la presión de vaporización del fluido” (p.76).

Estas cavidades posteriormente implotan, y si estas lo hacen contra una superficie, el impacto violento de las partículas de agua que actúan en una sucesión rápida a presiones muy altas, de mantenerse sobre un periodo de tiempo, causara un daño sustancial a la superficie, razón por la cual se justifica la no admisión de este fenómeno en el cimacio vertedor.

Alegret & Pardo (2005) con respecto a la ruptura de vacío señalan:

Es aquel fenómeno que tiene lugar cuando la lámina de agua que vierte sobre el cimacio se despega, cuando esto ocurre se produce la penetración de la atmósfera y por consiguiente la desaparición de la zona de vacío y la reducción de la capacidad de descarga del aliviadero, lo cual hace que la carga hidráulica sobre el vertedor aumente apreciablemente y por ende se pueden alcanzar alturas en el embalse por encima del nivel de aguas máximas previsto. (p.60)

2.2.2.3. Transiciones.

El uso de las transiciones en un aliviadero, está determinado por la necesidad de reducir los costos de construcción de los aliviaderos que presentan grandes longitudes vertedoras, ya que de mantenerse estas en las restantes partes del aliviadero aguas abajo, se originarían grandes volúmenes de excavación y de hormigón. (Alegret & Pardo, 2005, p.114)

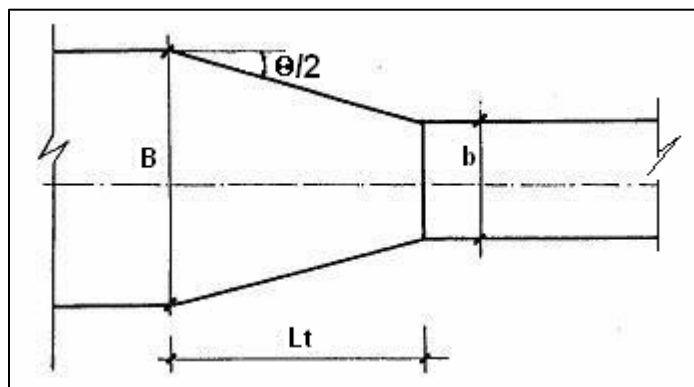


Figura 8. Vista en planta de una transición

Nota. Recuperado de "Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas", Alegret, E. & Pardo, R., 2005, p.115, La Habana, Cuba.

En las transiciones pueden aparecer tres regímenes de circulación del flujo a través de ellas, entre ellos están:

- Régimen supercrítico.
- Régimen subcrítico.
- Régimen transicional.

el régimen supercrítico caracterizado por la poca altura que alcanza en los muros laterales en la transición (perfiles 1 y 2 en Fig.9), el régimen subcrítico se caracteriza por tener al inicio de la transición el salto hidráulico (perfil 4 en Fig.9), y el régimen transicional donde el flujo se encuentra en tránsito del régimen supercrítico a uno

subcrítico, el cual es considerado indeseable, pues no define con rigor la posición del salto hidráulico ya que la misma varía con el caudal (perfil 3 en Fig.9).

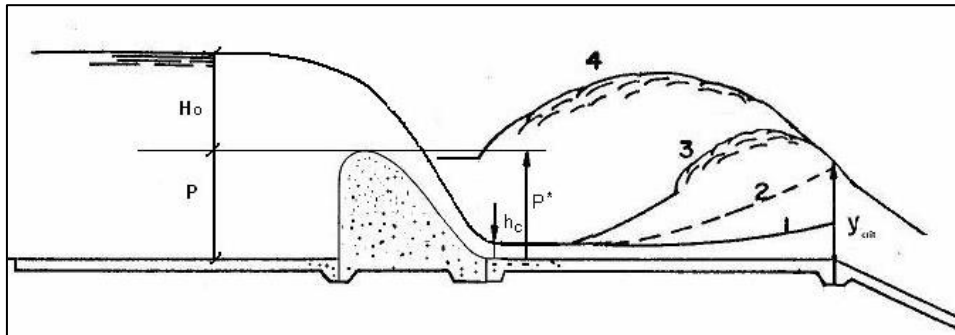


Figura 9. Perfiles de los regímenes de circulación del flujo en una transición

Nota. Recuperado de “Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas”, Alegret, E. & Pardo, R., 2005, p.117, La Habana, Cuba.

2.2.2.4. Rápida o conducto de descarga.

El conducto de descarga sirve para llevar los volúmenes excedentes hacia el río aguas debajo de la presa, esta estructura puede ser un canal a cielo abierto, conducto cerrado. “En esta estructura el flujo puede desarrollar grandes velocidades, por lo que aumenta el riesgo de daños por cavitación” (Rosales, 2013, p.04).

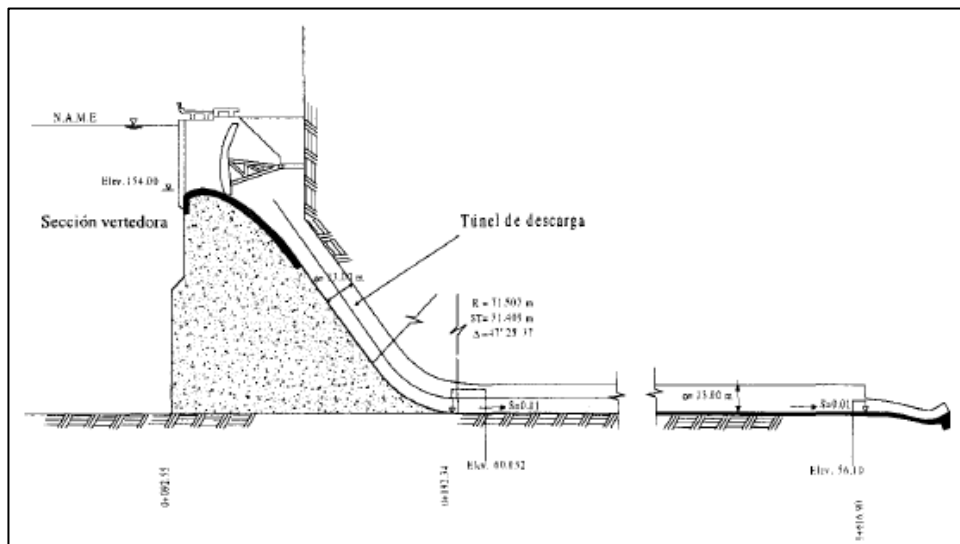


Figura 10. Perfil de un conducto de descarga

Nota. Recuperado de “Obras de Excedencia”, Arreguín, F., 2000, p.23, Morelos, México: IMTA.

2.2.2.5. Estructuras terminales o disipadoras de energía.

Arreguín & Alcocer (2011) afirman sobre la estructura terminal: “Tiene por objeto disipar la energía cinética del agua para evitar daños en la zona de descarga que pudieran repercutir en la seguridad de la presa” (p.19). Esto debido a que el agua que circula por una rápida, adquiere una gran energía cinética.

Existen distintos tipos de disipadores de energía, entre ellos presentamos los siguientes:

- Saltos de esquí.
- Cubetas disipadoras.
- Tanques amortiguadores.

2.2.2.5.1. Saltos de esquí.

Con este tipo de estructuras se logra un incremento de la disipación de energía utilizando chorros de caída libre que se proyectan lejos de la presa, esto con el fin de evitar la socavación al pie de esta. La trayectoria del chorro depende de la descarga, de su energía en el extremo y del ángulo con el que sale del trampolín. “Se recomienda que el ángulo de salida ϕ no sea mayor de 30° . Además, con objeto de evitar las fuertes presiones en la plantilla, los radios de la cubeta deber ser grandes” (Arreguín & Alcocer, 2011, p.117).

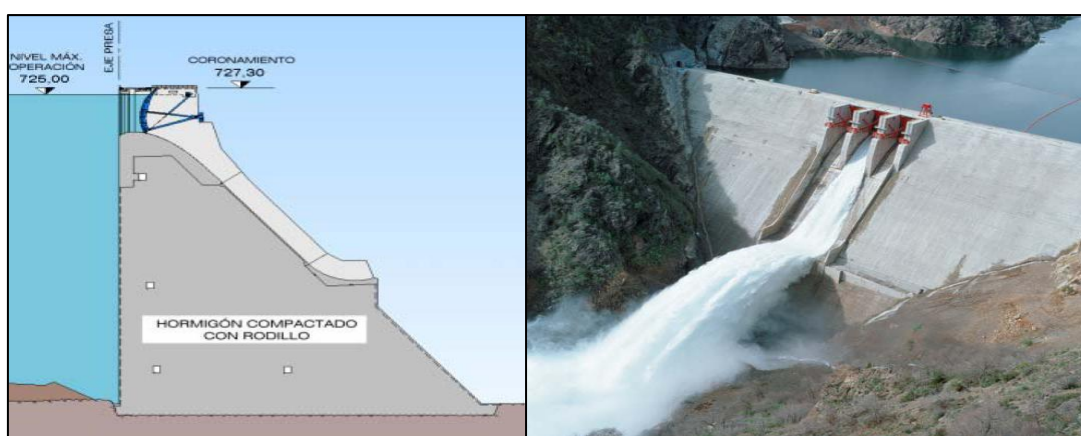


Figura 11. Perfil y vista de operación del vertedero con salto de esquí de la presa Ralco, Biobío, Chile

Nota. Recuperado de “Estudio sobre el Comportamiento Hidrodinámico de un Tanque Amortiguador”, Álvarez, I., 2013, p.22, Ciudad de México, México.

2.2.2.5.2. *Cubetas disipadoras.*

Entre ellas tenemos:

- Cubetas tipo USBR.
- Cubeta lisa tipo Lievi-Chertousov.

Las cubetas tipo USBR se emplean cuando el tirante de agua del conducto de descarga es demasiado grande para la formación del resalto hidráulico.

El comportamiento hidráulico de estos disipadores se manifiesta principalmente por la formación de dos remolinos, uno superior, alojado en la curvatura de la cubeta y moviéndose en sentido contrario a las agujas del reloj, y el otro inferior, aguas debajo de la cubeta, moviéndose en el sentido de las agujas del reloj. El movimiento de estos remolinos, que se entremezclan con la corriente afluyente, consigue la disipación de la energía de una manera eficiente e impide, al mismo tiempo, una excesiva erosión aguas abajo. (United States Bureau of Reclamation [USBR], 1987, p.398)

Son dos tipos de cubetas tipo USBR, una lisa y otra dentada con comportamientos hidráulicos muy similares, en el caso de la cubeta lisa la corriente de alta velocidad es lanzada hacia arriba, lo cual produce una fuerte ebullición en la superficie, así como un gran remolino que gira en el sentido horario al pie de la cubeta. En la cubeta dentada o de lanzamiento múltiple, el chorro de alta velocidad sale formando un ángulo más plano y solamente parte se abre camino hacia la superficie, con lo cual la ebullición es mucho menos violenta y la dispersión de la corriente, en la región superior del remolino inferior, es mucho más perfecta.

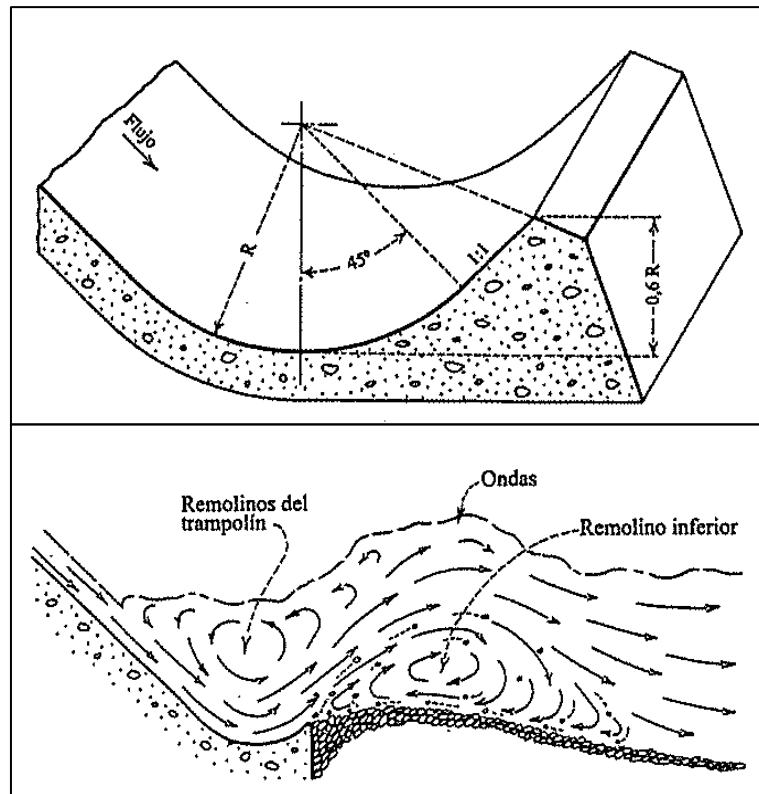


Figura 1213. Vista isométrica y funcionamiento de una cubeta tipo USBR lisa

Nota. Recuperado de "Diseño de Pequeñas Presas", USBR, 1987, p.476, Madrid, España: Bellisco Ediciones

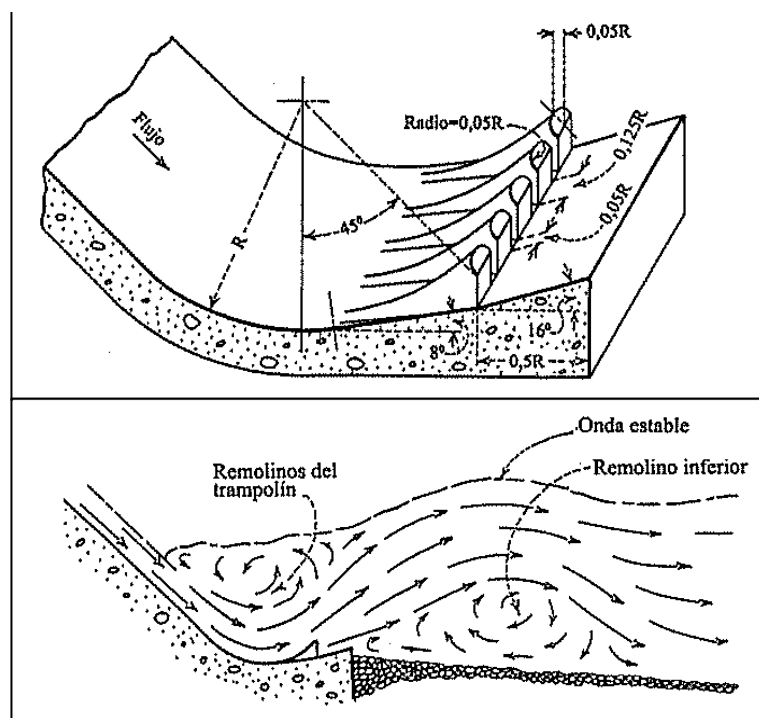


Figura 12. Vista isométrica y funcionamiento de una cubeta tipo USBR dentada

Nota. Recuperado de "Diseño de Pequeñas Presas", USBR, 1987, p.476, Madrid, España: Bellisco Ediciones

Las cubetas lisas tipo Lievi-Chertousov, son de extremada sencillez constructiva.

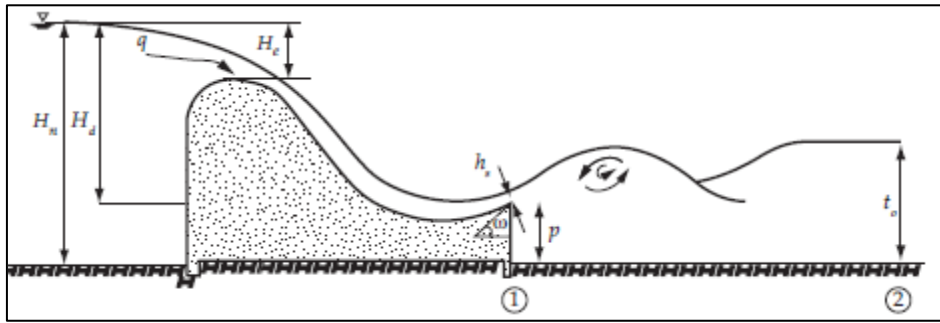


Figura 14. Perfil de una cubeta lisa tipo Lievi-Chertousov

Nota. Recuperado de "Diseño Hidráulico de Vertedores", Arreguín, F. & Alcocer, V., 2011, p.119, Morelos, México: IMTA.

2.2.2.5.3. Tanques amortiguadores.

Es el sistema más común de disipación de energía que convierte el flujo supercrítico del vertedero en un flujo subcrítico compatible con el régimen de río aguas abajo. El método más común para lograr esta transición del flujo consiste en un simple resalto sumergido, formado en un tanque de amortiguación de sección transversal rectangular. (Novak et al., 2001, p. 206)

En este tipo de disipador de energía se utilizan distintos accesorios con el propósito de incrementar por un lado la disipación de la energía y contribuir por otro en la estabilización del flujo que abandona dicho tanque. Estos son: los dientes deflectores, dados amortiguadores y el umbral terminal.

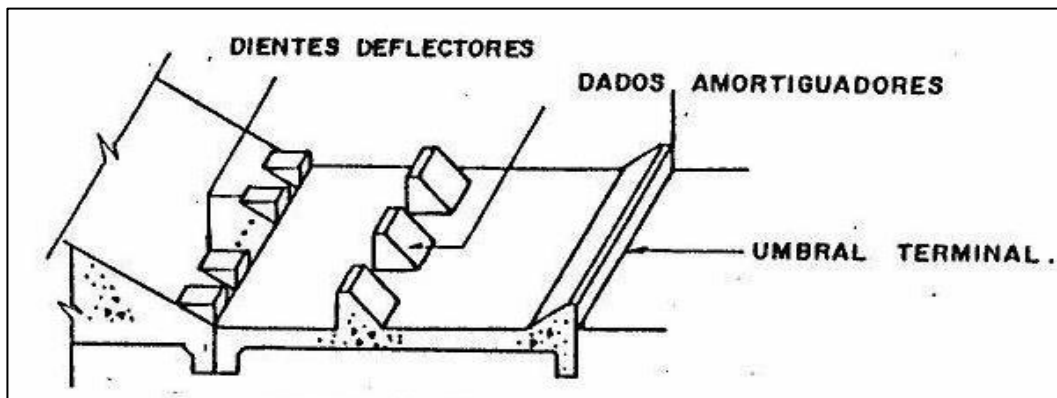


Figura 15. Localización de los accesorios en un tanque amortiguador

Nota. Recuperado de "Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas", Alegret, E. & Pardo, R., 2005, p.209, La Habana, Cuba.

Los dados deflectores se ubican en la entrada del taque amortiguador, para fragmentar el chorro e incrementar la profundidad del flujo que entra a dicha estructura, además su presencia contribuye a crear la turbulencia requerida en la disipación de la energía y como resultado de esto se pueden obtener longitudes de tanques más cortos.

Los dados amortiguadores son instalados en el tanque para estabilizar la formación del salto hidráulico e incrementar la turbulencia del flujo, con lo que se logra una mejor disipación de energía. Además, cuando por el vertedero circulan gastos pequeños estos contribuyen a compensar las deficiencias del tirante aguas abajo, mientras que, para gastos grandes de circulación, contribuyen a reflejar el flujo alejado del lecho del río.

El umbral terminal se construye al final del estanque con el propósito de controlar la erosión que se producirá en el lecho del río.

Dentro de los tipos de tanques amortiguadores, tenemos:

- Tanque rectangular tipo St. Anthony Falls (SAF).
- Tanque rectangular tipo USBR (I).
- Tanque rectangular tipo USBR (II).
- Tanque rectangular tipo USBR (III).

Tanque rectangular tipo St. Anthony Falls (SAF), Arreguín & Alcocer (2011) afirman: “Es recomendable para obras de excedencia menores, como presas derivadoras o caídas en canales donde el número de Froude oscila entre 1.70 y 17.00” (p.124).

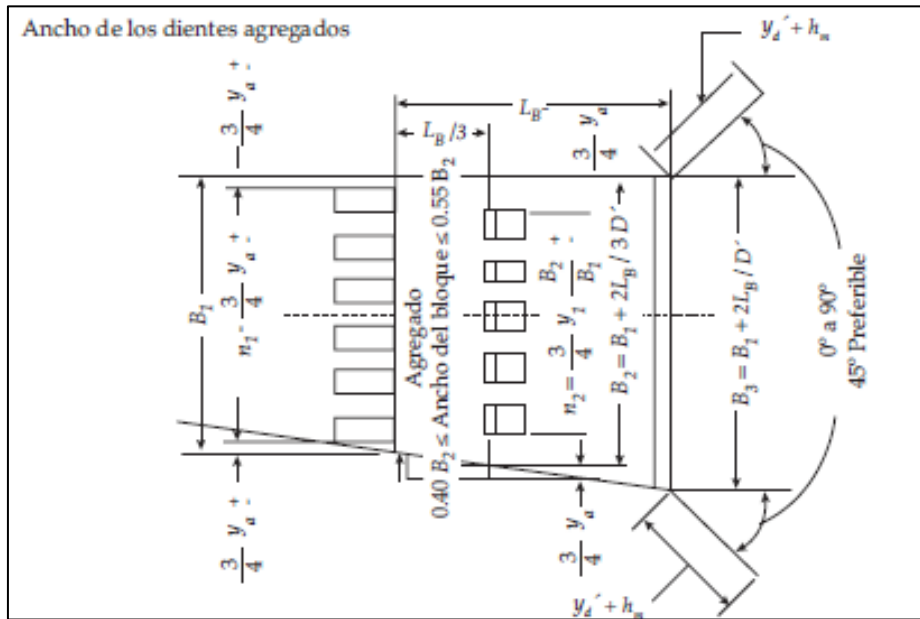


Figura 16. Planta de un tanque rectangular tipo SAF

Nota. Recuperado de "Diseño Hidráulico de Vertedores", Arreguín, F. & Alcocer, V., 2011, p.125, Morelos, México: IMTA.

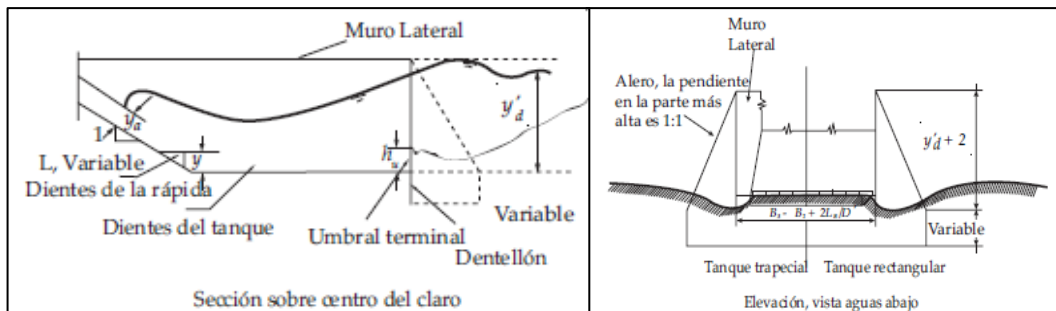


Figura 17. Vista de una sección y elevación de un tanque rectangular tipo SAF

Nota. Recuperado de "Diseño Hidráulico de Vertedores", Arreguín, F. & Alcocer, V., 2011, p.126, Morelos, México: IMTA.

Tanque rectangular tipo USBR (I), es recomendable para grandes caídas en canales o presas derivadoras, cuando los números de Froude varían entre 2.50 y 4.50. La USBR (1987) sobre este tipo de tanque afirma que:

No se produce un verdadero resalto hidráulico y la corriente se llama entonces de transición. Los tanques que deben construirse para este tipo de corriente no son muy efectivos para asegurar la amortiguación, ya que los dispositivos ordinarios no pueden controlar el oleaje superficial. Las olas que se producen se propagan más allá del extremo del tanque y es necesario amortiguarlas con otros medios. (p.388)

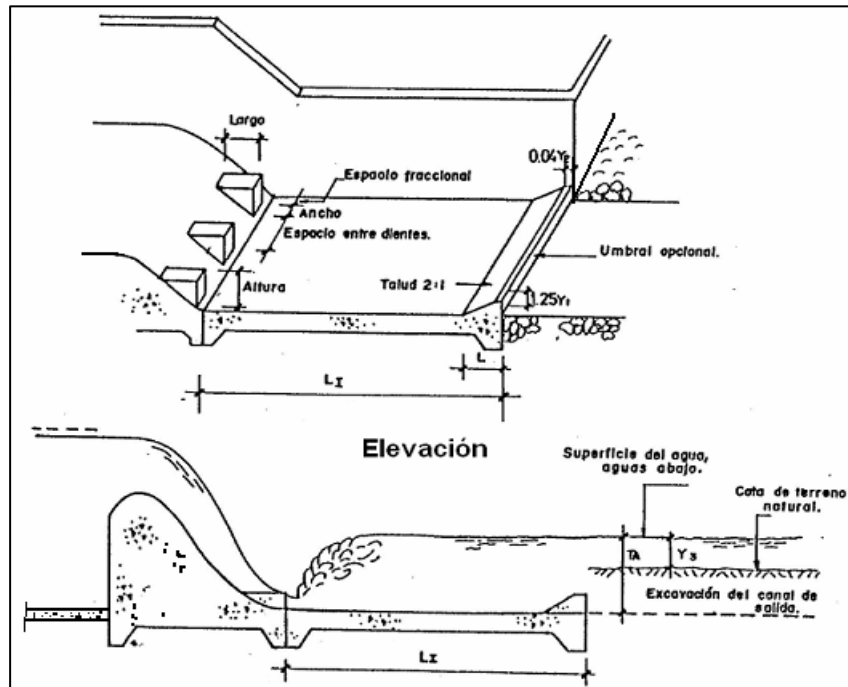


Figura 18. Vista isométrica y elevación de un tanque rectangular tipo USBR (I)

Nota. Recuperado de "Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas", Alegret, E. & Pardo, R., 2005, p.213, La Habana, Cuba.

Tanque rectangular tipo USBR (II), Son recomendados para números de Froude mayores de 4.50 y velocidades menores de 15.25 m/s. En su diseño se incorporan los dientes deflectores, dados amortiguadores y el umbral terminal para disminuir la longitud del resalto hidráulico y disipar el caudal de alta velocidad.

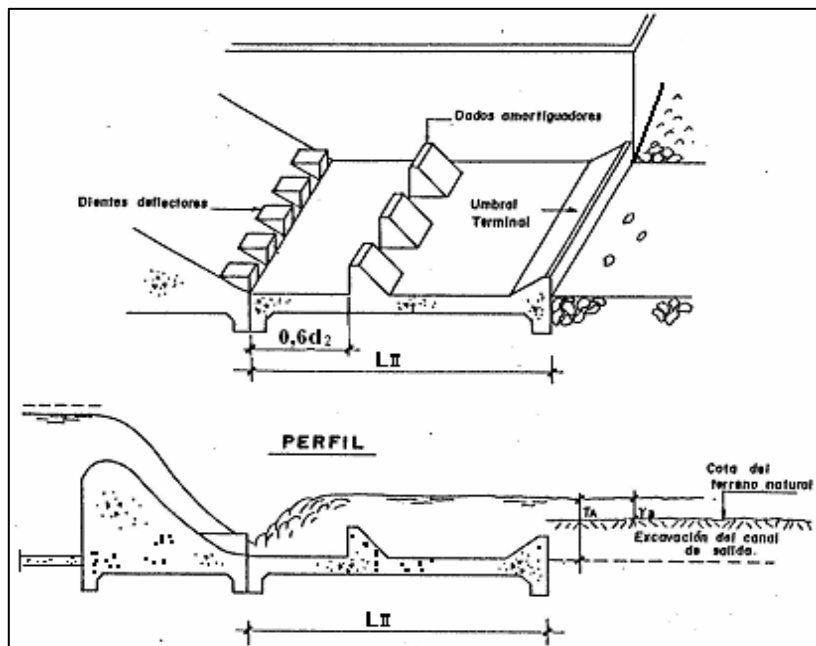


Figura 19. Vista isométrica y elevación de un tanque rectangular tipo USBR (II)

Nota. Recuperado de "Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas", Alegret, E. & Pardo, R., 2005, p.216, La Habana, Cuba.

Tanque rectangular tipo USBR (III), Es recomendable para números de Froude mayores de 4.50 y velocidades mayores de 15.25 m/s. Se utiliza en presas altas con velocidades de llegada mayores de 15.00 m/s, caídas hasta de 60.00 m y gastos unitarios de 50.00 m²/s. Su longitud es mayor a la del tipo II, ya que la disipación de energía se debe fundamentalmente al resalto hidráulico.

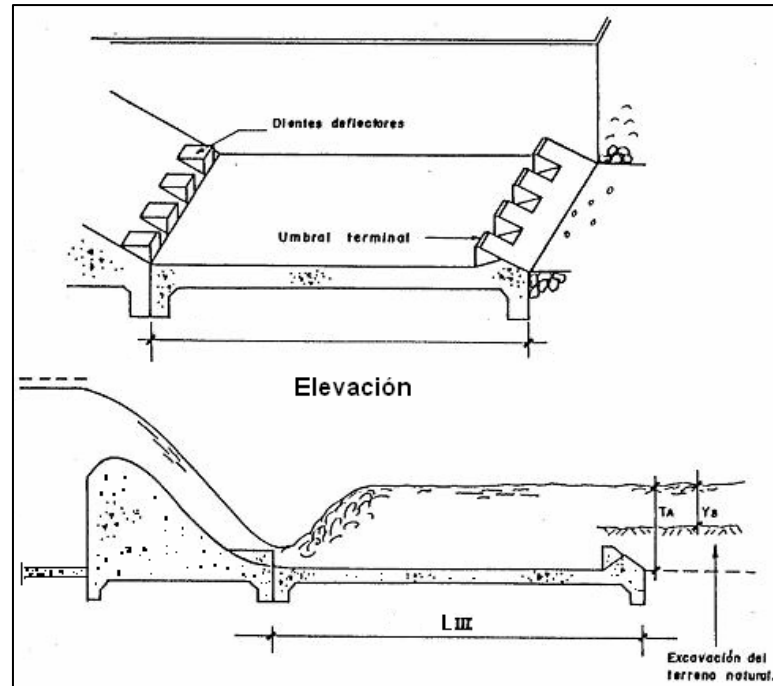


Figura 20. Vista isométrica y elevación de un tanque rectangular tipo USBR (III)

Nota. Recuperado de "Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas", Alegret, E. & Pardo, R., 2005, p.218, La Habana, Cuba.

2.2.2.6. Canal de salida.

El canal de salida es la estructura que capta el agua que sale de la estructura terminal, su función es la de conducir el agua nuevamente al río. No siempre se requiere construir un canal de salida, esto depende de las condiciones topográficas, de la calidad de la roca, de la disposición de otras estructuras entre otras.

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Vertederos Escalonados

De acuerdo con Amador, Sánchez-Juny y Dolz (2006):

Los Vertederos Escalonados son compatibles con las pendientes y métodos de colocación empleados en la construcción de presas, además por su geometría permiten disipar una importante proporción de energía del agua a lo largo del aliviadero (Vertedero) permitiendo reducir, y eventualmente eliminar, el cuenco amortiguador al pie de presa. (p.290)

Una característica de estos tipos de vertederos es que varían el régimen de escurrimiento de acuerdo, principalmente, a la geometría del mismo y a los rangos de caudales característicos a los que se encuentra sometido.

Existe un número importante de autores que han investigado los diferentes flujos en estructuras escalonadas (Chanson, Tozzi, Chinnarasri, entre otros) y cada uno presenta diferentes relaciones de origen empírico para definir los límites entre aquellos.

2.3.2. Tipos de flujo

Dependiendo de la geometría del escalón y del caudal circulante se puede encontrar distintos tipos de flujos sobre el vertedero escalonado. Se distinguen tres tipos de flujos: el flujo escalón a escalón que ocurre para bajos valores de caudal unitario e inclinación y el flujo rasante que se establece, fijado la pendiente, para mayores caudales. Para caudales intermedios se identificó un flujo entre el flujo escalón a escalón y el flujo rasante, conocido como flujo de transición.

2.3.2.1. Flujo escalón a escalón.

También llamado flujo saltante o “nappe”, se desarrolla cuando el gasto que fluye en el vertedor es relativamente pequeño. Este flujo se caracteriza por una sucesión

de caídas libres. El flujo sale de un escalón como una lámina libre e impacta en el peldaño siguiente pudiendo ocurrir, o no, un resalto hidráulico en la huella del peldaño.

En el caso de que la lámina impacte completamente en la huella, el régimen suele denominarse flujo escalón a escalón aislado y es aún subdividido en dos sub-regímenes: flujo escalón a escalón con resalto hidráulico totalmente desarrollado para bajos caudales unitarios, y flujo escalón a escalón con resalto hidráulico parcialmente desarrollado. Basado en estudios experimentales, Chanson(1994) propuso una expresión para el máximo caudal en que ocurre el resalto hidráulico totalmente desarrollado, en función de la altura y longitud de los escalones:

$$\frac{y_c}{h} < 0.0916 \left(\frac{h}{l} \right)^{-1.276} \quad (1.1)$$

donde y_c es el calado crítico, h la altura del peldaño y l la longitud de la huella de un escalón. (p 44)

Chanson (2002) propuso que el flujo saltante puede a su vez ser dividido en tres subtipos:

- Flujo saltante con salto hidráulico totalmente desarrollado (tipo NA1).
- Flujo saltante con salto hidráulico parcialmente desarrollado (tipo NA2).
- Flujo saltante sin salto (tipo NA3).



Figura 21. Tipos de flujo escalón en escalón

Nota. Recuperado de "Flujo de Aire en Vertederos Escalonados", Rosales, J., 2013, p.77, Ciudad de México, México.

En el flujo escalón a escalón con salto hidráulico totalmente desarrollado (NA1), el régimen crítico está presente cerca de cada vértice exterior de un peldaño. En el

caso del flujo escalón a escalón con salto hidráulico parcialmente desarrollado (NA2), el flujo es siempre supercrítico (existiendo únicamente turbulencia aguas abajo de la zona de impacto).

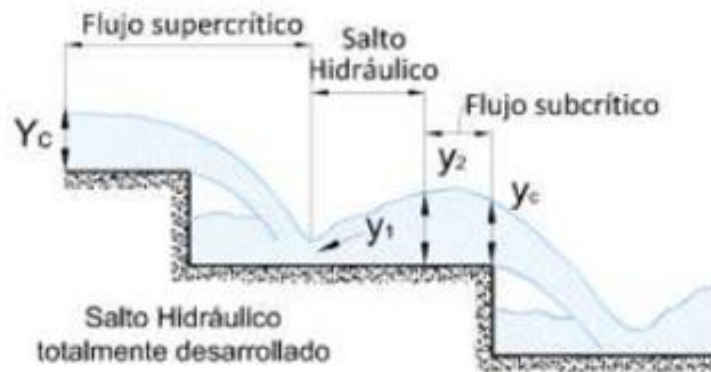


Figura 22. Flujo escalón a escalón aislado con resalto hidráulico totalmente desarrollado.

Nota. Recuperado de "Flujo de Aire en Vertederos Escalonados", Rosales, J., 2013, p.78, Ciudad de México, México.

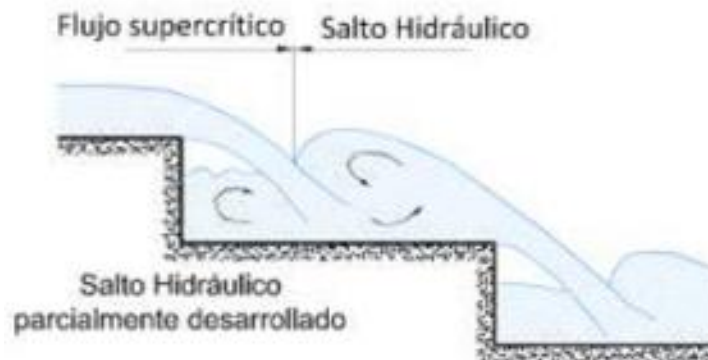


Figura 23. Flujo escalón a escalón aislado con resalto hidráulico parcialmente desarrollado.

Nota. Recuperado de "Flujo de Aire en Vertederos Escalonados", Rosales, J., 2013, p.78, Ciudad de México, México.

En flujo escalón a escalón con resalto totalmente desarrollado, el régimen crítico está presente cerca de cada vértice exterior de un peldaño, en el caso del flujo escalón a escalón con resalto hidráulico parcialmente desarrollado, el flujo es siempre supercrítico (existiendo únicamente turbulencia aguas abajo de la zona de impacto).

La zona cerca de la contrahuella se caracteriza por la existencia de una cavidad de aire y un colchón de agua recirculando, la entrada de aire ocurre a través de la superficie superior e inferior de la lámina de agua y por el mecanismo de impacto del chorro en el colchón de agua receptor.

En este tipo de flujos la disipación de energía se debe a la fragmentación del chorro en la atmosfera; al impacto y mezcla del chorro en el peldaño y a la formación del resalto hidráulico.

Estos dos tipos de flujo escalón a escalón pueden ser analizados como una sucesión de estructuras de caída. Utilizando ecuaciones de las trayectorias de la lámina y consideraciones de cantidad de movimiento,

Chanson (1994, p 44) presentó ecuaciones para las propiedades del flujo en el impacto del chorro y aguas abajo de esa zona:

$$\frac{d_1}{h} = 0.54 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{1.275} \quad (2.2)$$

$$\frac{d_2}{h} = 1.66 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.81} \quad (2.3)$$

$$\frac{d_p}{h} = \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.66} \quad (2.4)$$

$$\frac{L_d}{h} = 4.30 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.81} \quad (2.5)$$

$$\frac{d_t}{h} = 0.687 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{1.483} \quad (2.6)$$

$$\tan(\theta) = 0.838 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.586}$$

$$\frac{L_r}{d_1} = 8 \left(\left(\frac{y_c}{h}\right)^{1.5} - 1.5 \right) \quad (2.8)$$

Donde las variables se definen en la siguiente Fig. 43

Las ecuaciones anteriores fueron deducidas asumiendo una perfecta aireación de la cavidad entre el flujo y la contrahuella. “En el caso que la presión en la cavidad caiga por debajo de la atmosférica, se producen oscilaciones en el chorro. Estas oscilaciones, también llamadas inestabilidades de Kelvin-Helmholtz” (Casperson, 1993, p 90), causan oscilaciones de la lámina de agua y movimiento de aire por debajo de la lámina de agua con ruido asociado. En el caso que la frecuencia natural del sistema aire agua sea próximo del de la estructura, pueden inducirse ciertos problemas de resonancia.

Para mayores caudales y/o pendientes más pronunciadas apenas parte del chorro impacta en la huella del peldaño, el sub-régimen se identifica como escalón a escalón parcial y el flujo es siempre supercrítico en el aliviadero.

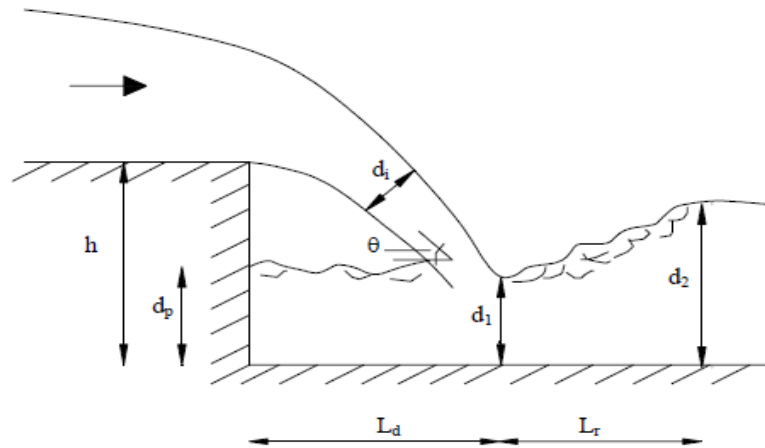


Figura 24. Flujo en caída libre, representación de las variables características, adaptado de Chanson, 2002, p 46

Nota. Recuperado de “Comportamiento Hidráulico en Aliviaderos Escalonados en Presas de Hormigón Compactado”, Tboas, A., 2006, p 9, Barcelona.

La hidráulica de este flujo supercrítico es más compleja, habiéndose observado fenómenos tridimensionales en el flujo: e.x. ondas de choque (Chanson, 2002, p 46).

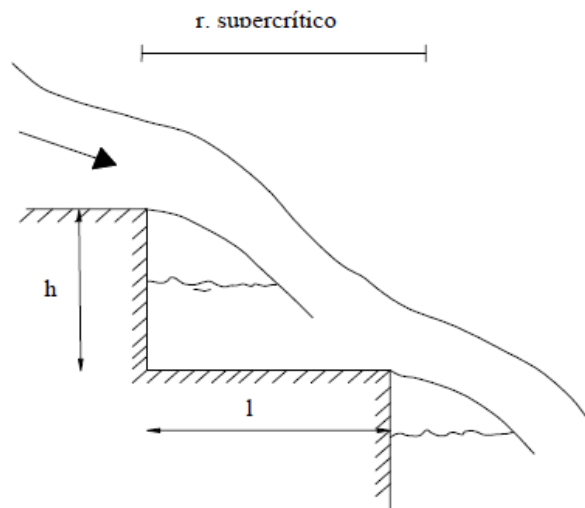


Figura 25. Flujo escalón a escalón parcial, adaptado de Canson, 2002, p 46.

Nota. Recuperado de “Comportamiento Hidráulico en Aliviaderos Escalonados en Presas de Hormigón Compactado”, Taboas, A., 2006, p 9, Barcelona.

Las propiedades del flujo escalón a escalón parcial no pueden ser previstas con cálculos analíticos.

“El diseño recomendado para una situación de flujo escalón a escalón es considerar el flujo escalón a escalón aislado con resalto hidráulico totalmente desarrollado” (Stephenson, 1991, p 150), esta afirmación implica bajas pendientes con peldaños de longitud considerable, lo que no es siempre una solución factible.

2.3.2.2. Flujo rasante.

El flujo rasante se caracteriza por una corriente con elevada concentración de aire que fluye rasante a los vértices de los escalones, por encima de un flujo secundario delimitado por las aristas de los escalones y que se intercambia con el flujo superior gracias a la elevada turbulencia. Este flujo secundario, se considera una zona de separación del flujo, y es el responsable de la disipación de energía a lo largo del aliviadero.

En los flujos de superficie o flujo rasante, el escurrimiento sobre las rápidas escalonadas presenta una región externa sobre los bordes de los escalones que actúan como falso fondo, y al área encerrada en cada escalón, con recirculaciones.

La capa límite desarrollada desde la cresta, aumenta hasta alcanzar la superficie libre. Este punto de contacto se conoce como Punto de Incepción, y marca el comienzo de un flujo gradualmente variado, donde la turbulencia produce una aireación natural de la superficie libre.

Hacia aguas abajo, el flujo se vuelve uniforme sin presentar cambios en el tirante, concentración de aire o distribución de velocidades.

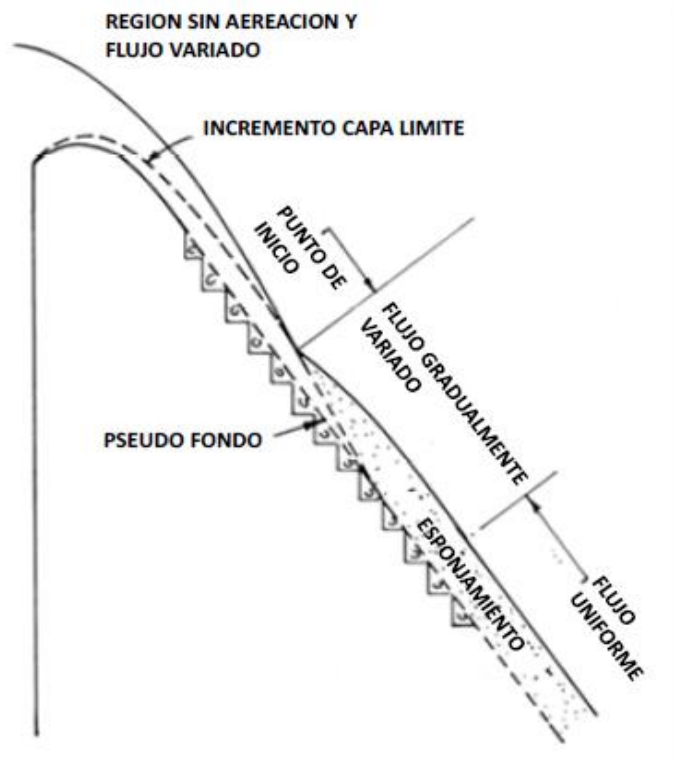


Figura 26. Regiones de flujo a lo largo de la rápida en flujos de superficie.

Nota. Recuperado de Khatsuria, 2005

El flujo rasante se puede dividir en un conjunto de regiones a lo largo de la rápida en: zona no airada; flujo rápidamente variado; gradualmente variado y uniforme.

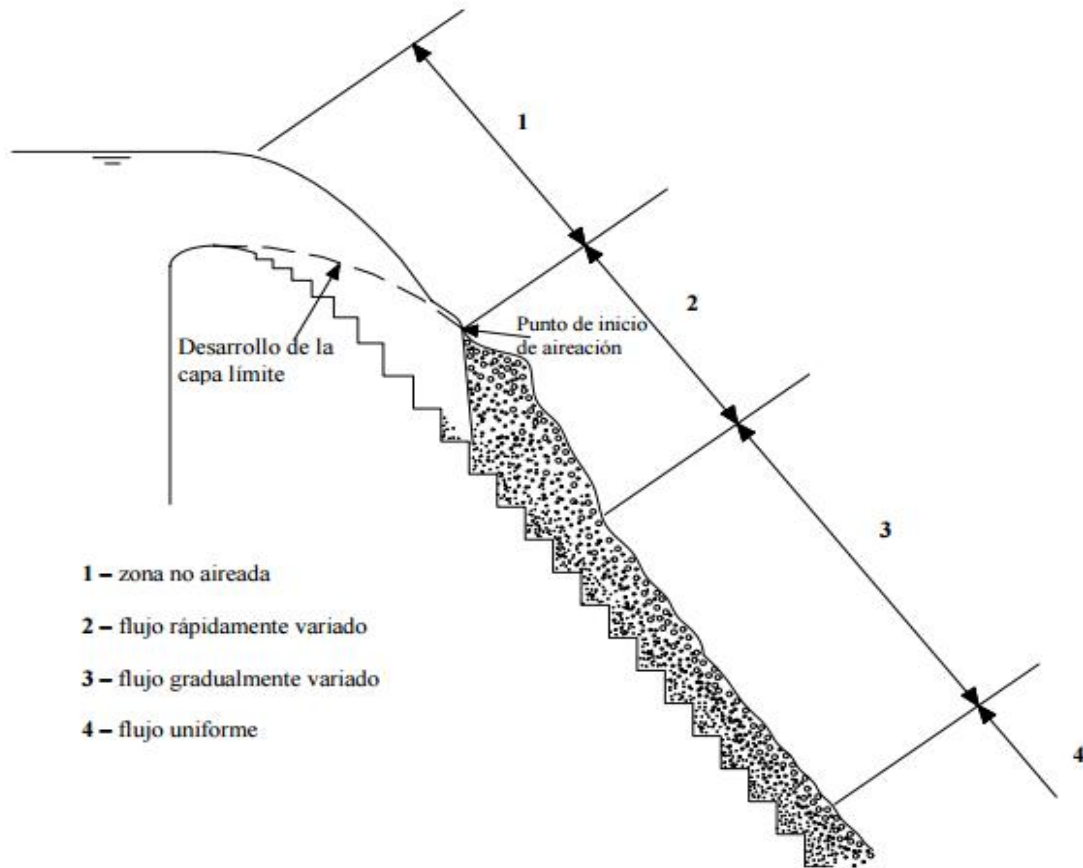


Figura 27. Flujo rasante en aliviaderos escalonados en presas de HCR.

Nota. Recuperado de “Comportamiento Hidráulico en Aliviaderos Escalonados en Presas de Hormigón Compactado”, Tboas, A., 2006, p 15, Barcelona.

La transición entre los tipos de flujo puede resumirse en función de la relación altura/ancho de los escalones de la rápida y el caudal específico (o tirante crítico). Chanson (2001) vincula la característica geométrica de los escalones (h y l , alto y largo respectivamente) con las características del escurrimiento (dc , tirante crítico). En la siguiente figura se grafican las relaciones que permiten diferenciar distintos tipos de escurrimiento en el vertedero escalonado, yendo desde el Flujo en Láminas para escalones largos y bajos caudales hasta el Flujo de Superficie con escalones altos y elevado caudal.

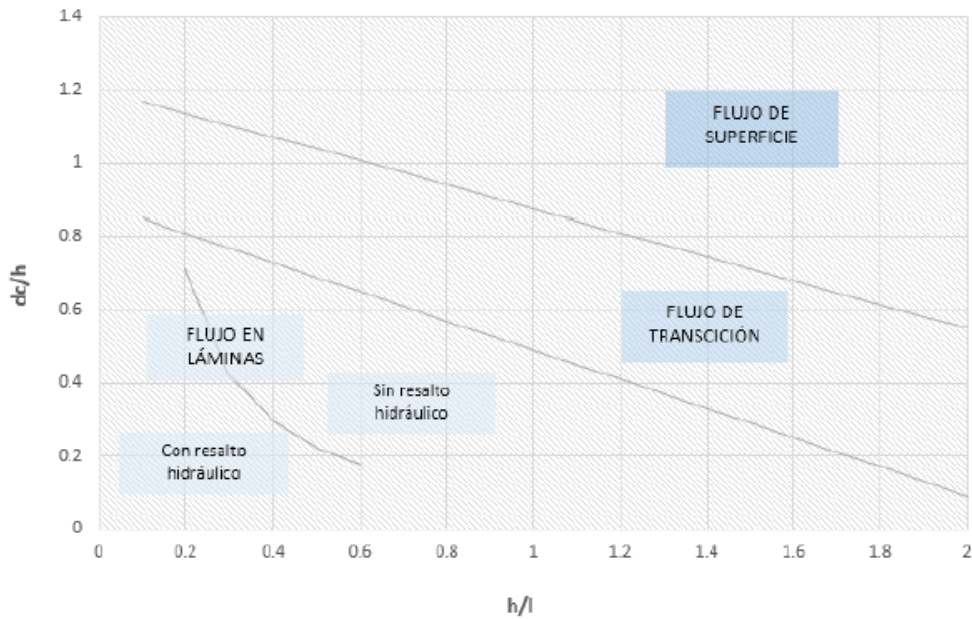


Figura 28. División de flujos presentes en estructuras escalonadas.
Nota. Recuperado Chanson, 2001.

2.3.2.3. Flujo de transición.

El flujo de transición se describe por la coexistencia del flujo escalón a escalón y flujo rasante en distintos peldaños. Se aprecia a lo largo del aliviadero la presencia de cavidades de aire de diferentes formas por debajo de la lámina de agua en algunos peldaños mientras en otros el flujo secundario (recirculación estable) ya se encuentra establecido. Ello proporciona una apariencia caótica en este tipo de régimen, con cambios significativos en las propiedades del flujo de un peldaño a otro.

El flujo sobre los escalones, contrariamente a lo que sucede en régimen rasante, no tiene un aspecto coherente, presentando un aspecto fragmentado y pulsátil con fuertes salpicaduras, dificultando la determinación de los calados en los peldaños.

Al incrementarse el caudal la zona de aireación debajo de la lámina vertiente comienza a ahogarse. Este régimen presenta aireación significativa y aspecto caótico, con propiedades del flujo variable escalón tras escalón.

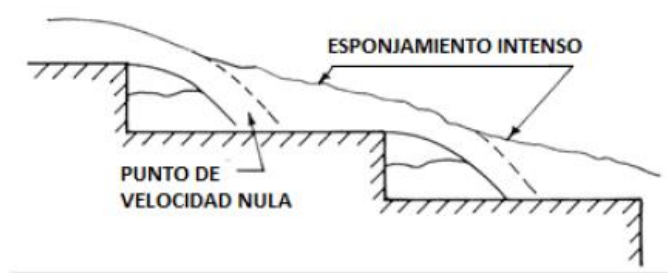


Figura 29. Flujo de transición.

Nota. Recuperado Khatsuria, 2005.

En Chanson y Toombes (2001) se muestran: “observaciones experimentales de las distribuciones de la concentración de aire y frecuencia del tamaño de las burbujas. El estudio se ha realizado para un aliviadero con pendiente de $\alpha= 3.4^\circ$ ($h=0.07$ m) y otro de mayor pendiente igual a $\alpha = 21.8^\circ$ ($h=0.10$ m). Los valores observados para la concentración media de aire son superiores a los valores en equilibrio conocidos para el flujo rasante y se denota una rápida aireación del flujo aguas abajo del punto de inicio de aireación”. (p.49)

“El comportamiento caótico asociado a las rápidas variaciones de las propiedades del flujo en cada peldaño, sugiere que el flujo de transición se caracteriza por fuertes fluctuaciones hidrodinámicas, debiendo estas condiciones del flujo ser evitadas para el caudal de proyecto”. (Chanson, 2002, 24, 46)

2.3.3. Disipación de Energía

En canales lisos de pendiente constante la mayor parte de la disipación de la energía se debe a la fricción del flujo con el fondo del canal. Tal y como se ha visto, en canales escalonados se presentan tres regímenes de flujos: (a) Escalón a Escalón, (b) Rasantes, (c) Transicional. En cada uno de dichos regímenes de flujos, se presentan diferentes modos de disipación de la energía

En canales escalonados, bajo el régimen de flujo rasante, además de la transmisión de esfuerzos del flujo con el fondo de canal se presenta un intercambio de momentum, entre los vórtices recirculantes que se forman debajo de la huella y contrahuella y la capa límite que se forma aguas abajo de cada vórtice (González & Chanson, 2007).

En flujos saltantes, la mayor disipación de la energía se logra a través del impacto del chorro en caída, con la huella del escalón

De acuerdo con Latessa y Sabarots (2014):

La disipación de energía es un tema de crucial importancia en estructuras de aliviaderos (Vertederos) debido a que es necesario controlar la energía cinética del flujo de manera controlada y garantizar la seguridad de la obra. Las pérdidas en las rápidas lisas resultan sustancialmente menores a aquellas logradas es rápidas con escalones. En estos últimos, la relación de energía disipada con respecto a la energía total disponible depende del tipo de escurrimiento presente. (p. 5)

Se observa en la Figura 49 la energía remanente al pie de la rápida en función de la altura de presa para el caso de flujo en láminas, considerando distintas alturas de escalón.

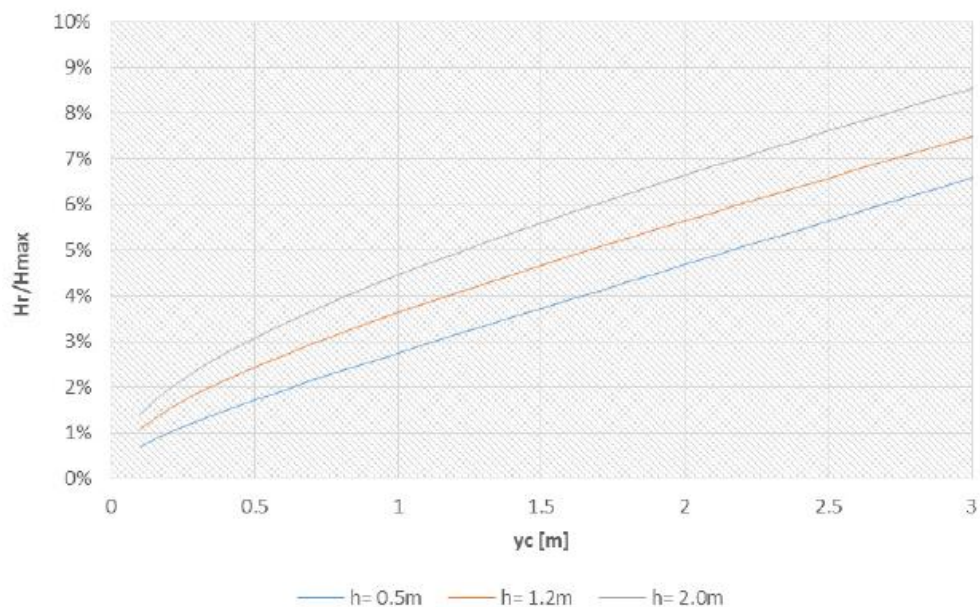


Figura 30. Relación de Energía remanente al pie de rápida sobre Energía total. Flujo en láminas

Nota. Recuperado Chanson, 2001.

Para el caso de flujos superficiales, ante la alta turbulencia presente, la disipación de energía difiere según se trate de un flujo uniforme o rápidamente variado.

En un flujo totalmente desarrollado y uniforme, las pérdidas a lo largo de la rápida pueden estimarse a partir de un coeficiente de fricción f de Darcy-Weisbach, considerando la rugosidad introducida por los escalones.

Siguiendo esta línea, varios autores han obtenido relaciones analíticas para obtener este coeficiente de fricción. En la siguiente figura se presentan algunos de ellos.

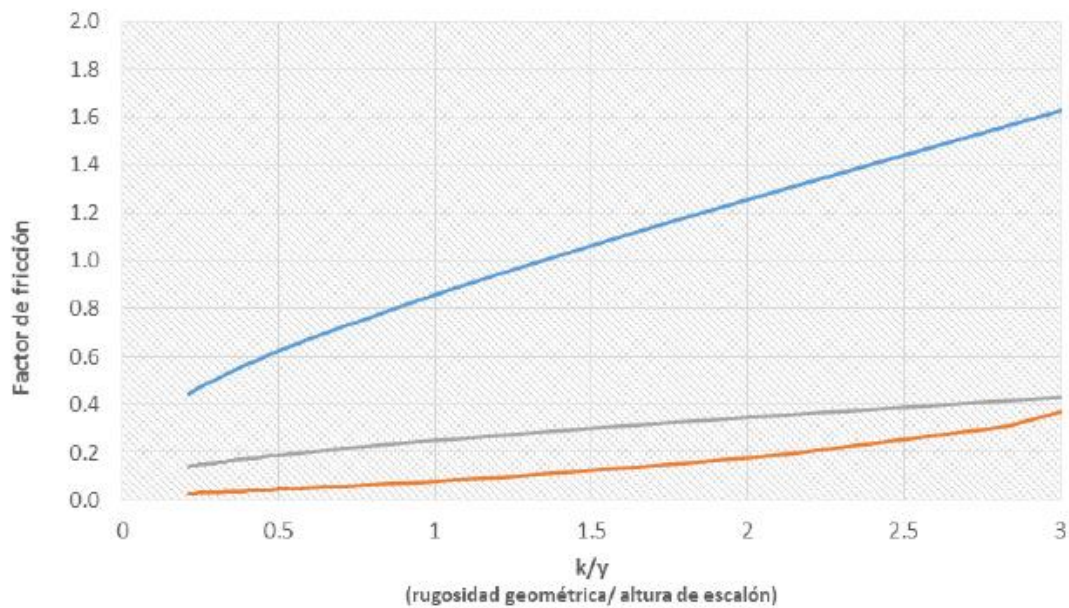


Figura 31. Valores del coeficiente de fricción en función de la rugosidad y el tirante.

Otros autores en cambio sugieren rangos para el coeficiente de fricción para experiencias con diferentes geometrías y caudales:

Rajaratnam (1990): $f = 0.2 - 1.12$; Promedio: 0.72

Chanson et al. (2001): $f = 0.42, 0.68, 1.2$

Matos et al. (1995): $f = 0.24 - 4$; Promedio: 0.72

2.3.4. Aireación

La aireación consiste en introducir aire en el flujo de manera natural o artificial. En el caso de la aireación natural, la teoría de las estrías longitudinales y la teoría del desarrollo de la capa límite explican el fenómeno y consideran los principales avances en el tema. En relación con la aireación inducida, se presentan los

principales tipos de aireadores, el mecanismo de aireación y algunos informes acerca del funcionamiento de aireadores construidos en diversas partes del mundo.

2.3.5. Avenida de Diseño

De acuerdo con la definición de Arreguín (2000):

Se llama avenida de diseño a aquella que entra en un vaso de almacenamiento y cuyo tránsito por el mismo produce escurrimientos que determinan la capacidad del vertedero. Otra definición necesaria es la avenida máxima probable, que es aquella que puede esperarse de la combinación de las condiciones meteorológicas críticas para la cuenca en estudio. La selección de la avenida de diseño depende básicamente del riesgo que se desee asociar a la construcción de la obra. (p. 13)

2.3.6. Resistencia al flujo

El rozamiento interno en un fluido da lugar a esfuerzos cortantes cuando dos capas adyacentes se mueven la una sobre la otra o cuando el fluido se mueve por tubos o se encuentra a un obstáculo. En algunos casos estos esfuerzos son despreciables si se comparan con fuerzas gravitatorias o con las originadas por diferencias de presión, la viscosidad puede considerarse como el rozamiento interno de un fluido. De acuerdo con Arturo Rocha Felices (2007) La viscosidad ejerce una fuerza para hacer que una capa líquida se deslice sobre otra. En efecto de la mayor o menor viscosidad del fluido sobre las condiciones de escurrimiento se expresa por el parámetro adimensional denominado número de Reynolds.

2.3.7. Modelación Física Reducida

Los modelos físicos reducidos guardan similitud física con el prototipo, y en lo que se reproduce el mismo tipo de fenómenos, pero siendo reducidas las magnitudes de las estructuras o conductos donde se presentan. Estos también son llamados modelos hidráulicos.

El uso de modelos hidráulicos implica que estos deben ser semejantes al prototipo, para lo cual deben satisfacer las leyes de similitud geométrica, cinemática y dinámica, que en su conjunto relacionan magnitudes físicas homologas definidas entre ambos sistemas.

En cada rayo de proyección que sale de una fuente hacia un centro homólogo, intercepta a puntos de ambos sistemas, denominados puntos homólogos, sobre los cuales se definen otras magnitudes, tales como: velocidad, presión, etc. De igual manera se definen lados, superficies y volúmenes homologos, que a su vez constituyen la similitud geométrica.

Cuando la comparación entre sistemas con respecto a un movimiento, se establece entonces la similitud cinemática y que se cumple cuando la forma de los patrones de flujos homologos es igual en cualquier tiempo, es decir, hay similitud en el movimiento de los sistemas.

Es un requisito que se cumpla la similitud geométrica para que se cumpla la similitud cinemática.

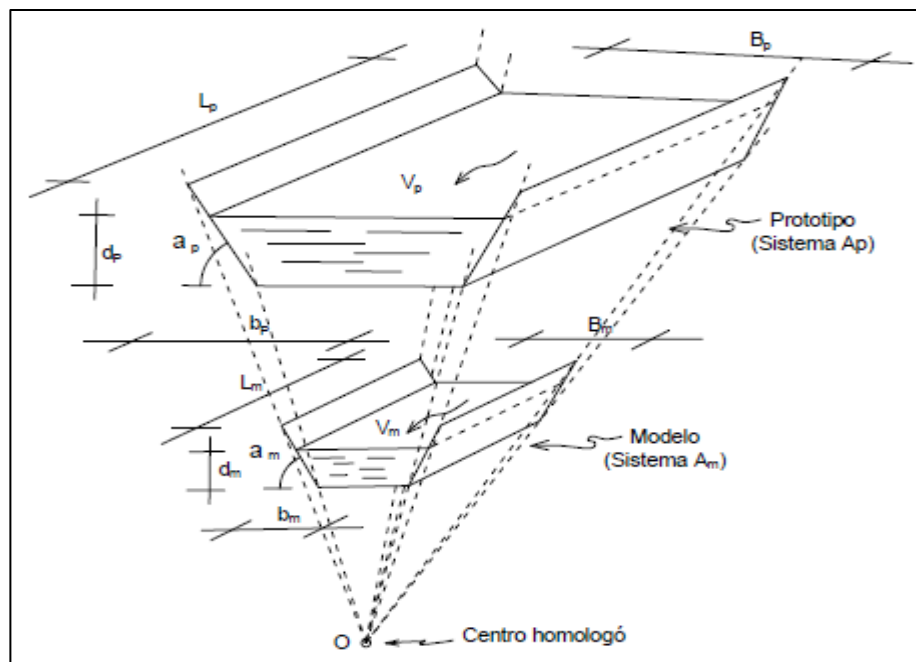


Figura 32. Proyección lineal del sistema modelo - prototipo

Nota. Recuperado de "Comportamiento del Flujo en Vertedores Escalonados con Descarga Convergente", Flores, W., 2015, p 36, México DF.

2.3.7.1. Similitud Geométrica

La semejanza geométrica implica, de modo estricto, que se cumpla que la relación entre dimensiones homólogas entre prototipo y modelo sea igual. Así mismo deben ser iguales todos los ángulos homólogos.

En otras palabras, un modelo y un prototipo son geoméricamente similares sí y sólo sí todas las dimensiones del cuerpo en la dirección de cada uno de los tres ejes coordenados, se relacionan mediante la misma escala de longitudes.

$$L_p = L_e * L_m$$

L_e = Escala de longitudes

L_p = Longitud en el prototipo

L_m = Longitud homologa en el modelo

2.3.7.2. Similitud Cinemática

Los movimientos en modelos y prototipo tienen similitud cinemática si partículas homólogas llegan a puntos homólogos en tiempos homólogos. Esto significa que las curvas de distribución de velocidades en secciones homólogas deben ser geoméricamente semejantes, independientemente del plano de referencia escogido.

Por tanto, la similitud cinemática obliga a que modelo y prototipo tengan una escala de líneas y también una escala de tiempos. Con ello se logra una escala única de velocidades.

$$V_e = V_p/V_m$$

V_e = Escala de velocidades

V_p = Velocidad en el prototipo

V_m = Velocidad en el modelo

$$T_e = T_p/T_m$$

T_e = Escala de tiempos

$T_p =$ Lapso de tiempo

$T_m =$ Lapso de tiempo en el modelo

2.3.7.3. Similitud Dinámica

Se cumple la semejanza dinámica si las fuerzas ejercidas por el fluido en puntos homólogos del modelo y prototipo están relacionadas entre sí mediante un valor fijo, que se denomina escala de fuerzas, F_e .

Las fuerzas que actúan sobre una partícula de fluido pueden ser debidas a la gravedad, F_g , a la presión, F_p , a la viscosidad, F_v y a la tensión superficial, F_σ . Si la suma de esas fuerzas más la de inercia F_i no es igual a cero, la partícula se acelerará. Por lo tanto, en equilibrio se cumple que:

$$F_g + F_p + F_v + F_\sigma - F_i = 0$$

2.3.8. Modelación numérica

2.3.8.1. Introducción.

Para llevar a cabo las simulaciones numéricas, se utilizó el modelo comercial Flow3D. En el cual se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cartesianas mediante el método del volumen finito con mallas estructuradas, y la superficie libre es capturada mediante el método True-VOF, el cual tiene mejoras importantes en comparación del método VOF tradicional. Este modelo tiene implementado los siguientes modelos de turbulencia: Smagorinsky, k-e y RNG.

Las pruebas numéricas se dividieron en dos partes, primeramente, se muestran modelaciones numéricas bidimensionales de algunos experimentos disponibles en la literatura, y posteriormente se simuló la geometría de la presa el Zapotillo, la cual se analizó experimentalmente en el laboratorio Enzo Levi del IMTA

2.3.8.2. Descripción del modelo numérico empleado.

La formulación de las ecuación de conservación de masa y las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cartesianas, utilizadas por el modelo Flow3D, son resueltas mediante el método del volumen finito en mallas estructuradas, y la superficie libre es capturada mediante el método True-VOF (Volume of Fluid).

La ecuación de conservación de masa que se resuelve en el modelo es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) + \xi \frac{uA_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Donde, ρ es la densidad de fluido, RSOR es una fuente de masa, (u, v, w) son las componentes de velocidad en las direcciones (x, y, z) , (A_x, A_y, A_z) son las fracciones de área de la celda perpendiculares a las direcciones (x, y, z) , y las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{xV_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_x) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y uv}{xV_F} &= -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_y) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_z) \end{aligned} \quad (2)$$

Donde (G_x, G_y, G_z) son las componentes aceleración de la gravedad en las direcciones (x, y, z) , (f_x, f_y, f_z) las aceleraciones viscosas debidas a los esfuerzos cortantes en las direcciones (x, y, z) .

La superficie libre del agua es determinada mediante la solución de la siguiente ecuación de transporte:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) + \zeta \frac{FA_x u}{x} \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (3)$$

Donde: F es la fracción de fluido, misma que toma valores de 0 a 1, donde el 0 es donde se tiene aire y 1 donde se tiene agua.

2.4. Sistema de Hipótesis

2.4.1. Hipótesis

Si usamos vertederos del tipo escalonado con variantes en su longitud de huella, podremos comprobar que existe una mejora en la disipación de energía para un mismo caudal.

2.4.2. Variables

2.4.2.1. *Variable independiente.*

Longitud de Huella en Vertederos Escalonado.

2.4.2.2. *Variable dependiente.*

Disipación de Energía.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y Nivel de Investigación

3.1.1. Tipo de Investigación

Por el tipo de la investigación, el presente estudio reúne las condiciones metodológicas de una investigación descriptiva, experimental y correlacional.

3.1.2. Nivel de Investigación

De acuerdo a la naturaleza del estudio de la investigación, reúne por su nivel las características de un estudio aprehensivo y comprensivo.

3.2. Población y Muestra

3.2.1. Población

Vertederos del tipo escalonado.

3.2.2. Muestra

02 prototipos de vertederos escalonados con variantes en la longitud de su huella.

3.3. Diseño de Investigación

La presente investigación consiste en recolectar información en dos muestras con el propósito de observar el comportamiento de una variable tratando de “controlar” estadísticamente otras variables que se considera pueden afectar la variable estudiada (Variable dependiente)

Este estudio lo podemos diagramar de la siguiente manera:

M1 O1 x y z

M2 O2 x y z

En el diagrama M1 y M2 son las muestras de trabajo y O1 y O2 son las observaciones o mediciones realizadas; mientras que xyz representa las variables controladas estadísticamente.

En esta investigación para determinar la resistencia al flujo y disipación de energía en obras de excedencia en forma analítica y experimental, se seleccionó dos muestras, una con gradas hidráulicas de dimensiones de 175mmx100mmx950mm de huella, contrahuella y sección transversal respectivamente, y otra con gradas hidráulicas de 150mmx100mmx950mm (M1 Y M2); se iguala la muestra usando el mismo caudal de entrada; se evalúa las velocidades y tirantes alcanzados para cada una de las condiciones (O1 Y O2).

3.4. Técnicas e Instrumentos de Investigación

Para el presente estudio se realizarán ensayos en prototipos a escala de dos vertederos del tipo escalonado, variando la dimensión de las gradas hidráulicas con un mismo caudal. Se tendrá como técnica de recolección de datos, la observación directa y como instrumento de medición, las notas de campo.

3.5. Procesamiento y Análisis de Datos

Se procesará la información obtenida mediante los siguientes softwares.

- MICROSOFT EXCEL: Desarrollo de hojas de cálculo que procesan los datos tomados y nos muestran los resultados para ser analizados.
- MICROSOFT WORD: Desarrollo del informe de investigación.
- MICROSOFT POWERPOINT: Para la sustentación del proyecto.
- AUTOCAD 2D: Para el modelado de prototipos
- SKECTHUP: Para el modelado de prototipos.
- FLOW 3D: Para la simulación del comportamiento del fluido en los prototipos.

IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Modelación Física (Experimental)

4.1.1. Definición de prototipos

A continuación, se presentan los gráficos de los prototipos y las tablas de toma de datos mediante las cuales se podrá recolectar la información para luego procesarla.

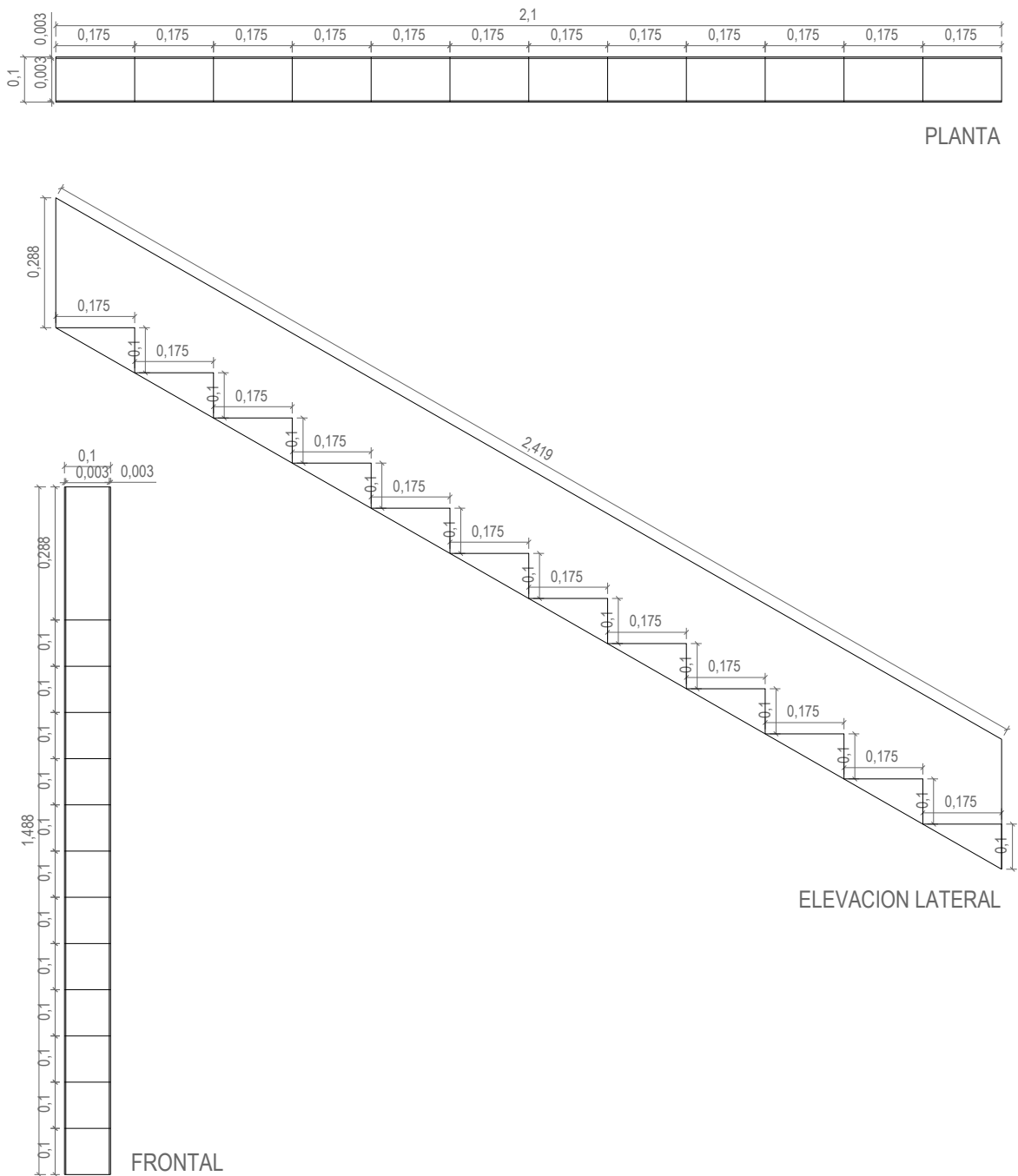


Figura 33. Prototipo 01, escalón de 0.175x0.10m
Fuente: Elaboración Propia

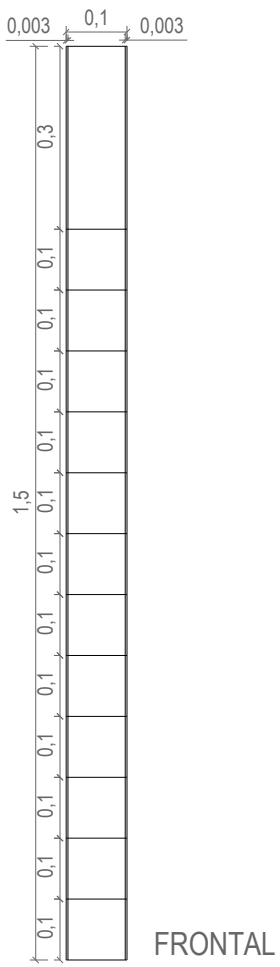
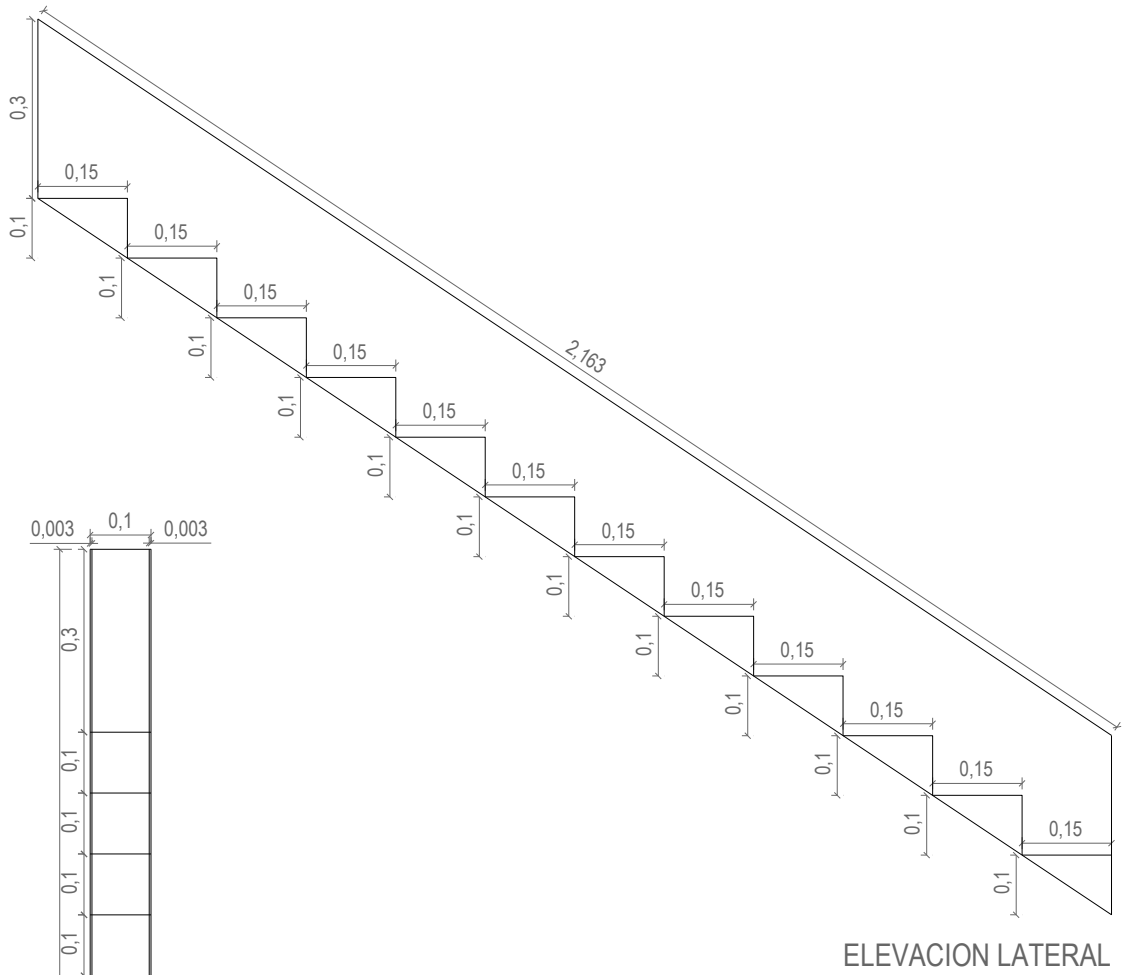
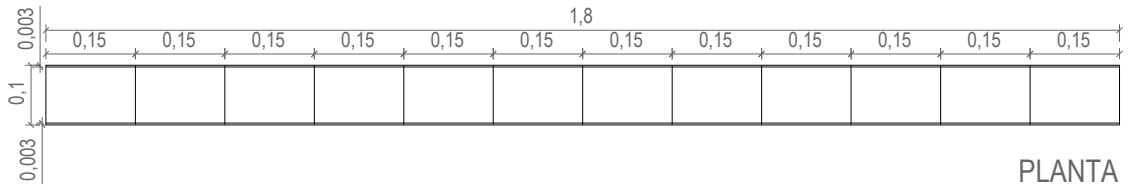


Figura 34. Prototipo 02, escalón de 0.15x0.10m
Fuente: Elaboración Propia

4.1.2. Cálculo de Caudal

Vertedero de pared gruesa con sección rectangular

➤ Caudal Teórico

$$Q_{\text{teórico}} = \varepsilon_1 C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Donde:

ε_1 : Epsilon

C_d : Coeficiente de descarga

g : Gravedad

b : Ancho de solera

H : Carga

$$\varepsilon_1 = 0.75 + \frac{0.1}{e/H}$$

$e = 10 \text{ cm}$

$H = 2.20 \text{ cm}$

Luego:

$\varepsilon_1 = 0.77$

$$C_d = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{H + 0.0011}{W} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{H} \right]^{3/2}$$

$$C_d = 0.62$$

Entonces:

$$Q_{\text{teórico}} = 0.44 \text{ l/s}$$

➤ Caudal Observado

Dónde:

t = tiempo

Vol = Volumen

Q = caudal

Tabla 1: Medición de Caudales

Nro	t (s)	Vol (l)	Q (l/s)
1	6.73	3.67	0.55
2	7.24	3.88	0.54
3	6.82	3.70	0.54
4	6.90	3.70	0.54
5	7.53	3.73	0.50
6	8.10	3.82	0.47
7	8.40	3.73	0.44
8	7.78	3.64	0.47
9	6.51	3.64	0.56
10	6.90	3.64	0.53

FUENTE: Elaboración Propia

Caudales obtenidos del ensayo con el equipo desmontable experimental.

$$Q_{\text{observado}} = 0.51 \text{ l/s}$$

➤ Caudal

Promediamos el caudal teórico y el caudal observado.

$$Q = 0.48 \text{ l/s}$$

4.1.3. Medición de Tirantes

L = coordenada en X

Y = tirante

V = velocidad

➤ Para Prototipo 01 (17.5x10cm)

Tabla 2. Medición de Tirantes - Prototipo 01

N°	L (mm)	Y (mm)
1	0	20.0
2	25	16.0
3	50	13.0
4	75	11.0
5	100	10.0
6	125	9.5
7	150	9.0
8	175	7.5
9	175	26.0
10	200	25.0
11	225	23.0
12	250	9.0
13	275	9.0
14	300	11.0
15	325	13.0
16	350	9.0
17	350	15.0
18	375	14.0
19	400	15.0
20	425	12.0
21	450	9.0
22	475	12.0
23	500	18.0
24	525	12.0
25	525	8.0
26	550	10.0
27	575	14.0
28	600	11.0
29	625	8.0
30	650	11.0
31	675	14.0
32	700	12.0
33	700	10.0
34	725	19.0
35	750	17.0
36	775	19.0
37	800	20.0
38	825	16.0
39	850	15.0
40	875	13.0

41	875	11.0
42	900	12.0
43	925	12.0
44	950	19.0
45	975	21.0
46	1,000	17.0
47	1,025	19.0
48	1,050	12.0
49	1,050	21.0
50	1,075	20.0
51	1,100	18.0
52	1,125	20.0
53	1,150	24.0
54	1,175	20.0
55	1,200	22.0
56	1,225	20.0
57	1,225	25.0
58	1,250	23.0
59	1,275	20.0
60	1,300	14.0
61	1,325	12.0
62	1,350	16.0
63	1,375	20.0
64	1,400	18.0
65	1,400	14.0
66	1,425	12.0
67	1,450	14.0
68	1,475	11.0
69	1,500	12.0
70	1,525	15.0
71	1,550	18.0
72	1,575	16.0
73	1,575	18.0
74	1,600	18.0
75	1,625	20.0
76	1,650	21.0
77	1,675	19.0
78	1,700	24.0
79	1,725	20.0
80	1,750	15.0
81	1,750	12.0
82	1,775	20.0
83	1,800	22.0
84	1,825	23.0
85	1,850	25.0
86	1,875	22.0

87	1,900	19.0
88	1,925	15.0
89	1,925	19.0
90	1,950	17.0
91	1,975	18.0
92	2,000	22.0
93	2,025	18.0
94	2,050	16.0
95	2,075	20.0
96	2,100	14.0

FUENTE: *Elaboración Propia*

➤ Para Prototipo 02 (15 x10cm)

Tabla 3. Medición de Tirantes - Prototipo 02

N°	L (mm)	Y (mm)
1	0	15.0
2	25	14.0
3	50	11.0
4	75	10.0
5	100	9.0
6	125	7.0
7	150	5.0
8	150	29.0
9	175	21.0
10	200	10.0
11	225	8.0
12	250	10.0
13	275	5.0
14	300	5.0
15	300	18.0
16	325	15.0
17	350	11.0
18	375	10.0
19	400	15.0
20	425	10.0
21	450	7.0
22	450	8.0
23	475	15.0
24	500	12.0
25	525	10.0
26	550	8.0
27	575	6.0

28	600	5.0
29	600	15.0
30	625	12.0
31	650	14.0
32	675	11.0
33	700	10.0
34	725	7.0
35	750	5.0
36	750	12.0
37	775	13.0
38	800	14.0
39	825	9.0
40	850	11.0
41	875	7.0
42	900	5.0
43	900	12.0
44	925	16.0
45	950	13.0
46	975	11.0
47	1,000	12.0
48	1,025	10.0
49	1,050	7.0
50	1,050	12.0
51	1,075	15.0
52	1,100	12.0
53	1,125	14.0
54	1,150	15.0
55	1,175	13.0
56	1,200	10.0
57	1,200	20.0
58	1,225	14.0
59	1,250	12.0
60	1,275	9.0
61	1,300	11.0
62	1,325	11.0
63	1,350	8.0
64	1,350	9.0
65	1,375	12.0
66	1,400	13.0
67	1,425	16.0
68	1,450	11.0
69	1,475	11.0
70	1,500	7.0
71	1,500	10.0
72	1,525	12.0
73	1,550	15.0

74	1,575	12.0
75	1,600	10.0
76	1,625	9.0
77	1,650	6.0
78	1,650	7.0
79	1,675	12.0
80	1,700	13.0
81	1,725	12.0
82	1,750	11.0
83	1,775	13.0
84	1,800	9.0

FUENTE: *Elaboración Propia*

4.1.4. Cálculo de Velocidades

Q = caudal

Y = tirante

V = velocidad

a = ancho

A = area

$$Q = V \times A$$

$$V = Q / (Y \times a)$$

➤ Para Prototipo 01 (17.5x10cm)

Tabla 4. Cálculo de Velocidad - Prototipo 01

N°	Q (m3/s)	Y (m)	V (m/s)
1	0.00048	0.020	0.251
2	0.00048	0.016	0.313
3	0.00048	0.013	0.386
4	0.00048	0.011	0.456
5	0.00048	0.010	0.501
6	0.00048	0.010	0.528
7	0.00048	0.009	0.557
8	0.00048	0.008	0.668
9	0.00048	0.026	0.193
10	0.00048	0.025	0.201
11	0.00048	0.023	0.218
12	0.00048	0.009	0.557
13	0.00048	0.009	0.557

14	0.00048	0.011	0.456
15	0.00048	0.013	0.386
16	0.00048	0.009	0.557
17	0.00048	0.015	0.334
18	0.00048	0.014	0.358
19	0.00048	0.015	0.334
20	0.00048	0.012	0.418
21	0.00048	0.009	0.557
22	0.00048	0.012	0.418
23	0.00048	0.018	0.278
24	0.00048	0.012	0.418
25	0.00048	0.008	0.627
26	0.00048	0.010	0.501
27	0.00048	0.014	0.358
28	0.00048	0.011	0.456
29	0.00048	0.008	0.627
30	0.00048	0.011	0.456
31	0.00048	0.014	0.358
32	0.00048	0.012	0.418
33	0.00048	0.010	0.501
34	0.00048	0.019	0.264
35	0.00048	0.017	0.295
36	0.00048	0.019	0.264
37	0.00048	0.020	0.251
38	0.00048	0.016	0.313
39	0.00048	0.015	0.334
40	0.00048	0.013	0.386
41	0.00048	0.011	0.456
42	0.00048	0.012	0.418
43	0.00048	0.012	0.418
44	0.00048	0.019	0.264
45	0.00048	0.021	0.239
46	0.00048	0.017	0.295
47	0.00048	0.019	0.264
48	0.00048	0.012	0.418
49	0.00048	0.021	0.239
50	0.00048	0.020	0.251
51	0.00048	0.018	0.278
52	0.00048	0.020	0.251
53	0.00048	0.024	0.209
54	0.00048	0.020	0.251
55	0.00048	0.022	0.228
56	0.00048	0.020	0.251
57	0.00048	0.025	0.201
58	0.00048	0.023	0.218
59	0.00048	0.020	0.251

60	0.00048	0.014	0.358
61	0.00048	0.012	0.418
62	0.00048	0.016	0.313
63	0.00048	0.020	0.251
64	0.00048	0.018	0.278
65	0.00048	0.014	0.358
66	0.00048	0.012	0.418
67	0.00048	0.014	0.358
68	0.00048	0.011	0.456
69	0.00048	0.012	0.418
70	0.00048	0.015	0.334
71	0.00048	0.018	0.278
72	0.00048	0.016	0.313
73	0.00048	0.018	0.278
74	0.00048	0.018	0.278
75	0.00048	0.020	0.251
76	0.00048	0.021	0.239
77	0.00048	0.019	0.264
78	0.00048	0.024	0.209
79	0.00048	0.020	0.251
80	0.00048	0.015	0.334
81	0.00048	0.012	0.418
82	0.00048	0.020	0.251
83	0.00048	0.022	0.228
84	0.00048	0.023	0.218
85	0.00048	0.025	0.201
86	0.00048	0.022	0.228
87	0.00048	0.019	0.264
88	0.00048	0.015	0.334
89	0.00048	0.019	0.264
90	0.00048	0.017	0.295
91	0.00048	0.018	0.278
92	0.00048	0.022	0.228
93	0.00048	0.018	0.278
94	0.00048	0.016	0.313
95	0.00048	0.020	0.251
96	0.00048	0.014	0.358

FUENTE: *Elaboración Propia*

➤ Para Prototipo 02 (15x10cm)

Tabla 5. Cálculo de Velocidad - Prototipo 02

N°	Q (m3/s)	Y (m)	V (m/s)
1	0.00048	0.015	0.334

2	0.00048	0.014	0.358
3	0.00048	0.011	0.456
4	0.00048	0.010	0.501
5	0.00048	0.009	0.557
6	0.00048	0.007	0.716
7	0.00048	0.005	1.003
8	0.00048	0.029	0.173
9	0.00048	0.021	0.239
10	0.00048	0.010	0.501
11	0.00048	0.008	0.627
12	0.00048	0.010	0.501
13	0.00048	0.005	1.003
14	0.00048	0.005	1.003
15	0.00048	0.018	0.278
16	0.00048	0.015	0.334
17	0.00048	0.011	0.456
18	0.00048	0.010	0.501
19	0.00048	0.015	0.334
20	0.00048	0.010	0.501
21	0.00048	0.007	0.716
22	0.00048	0.008	0.627
23	0.00048	0.015	0.334
24	0.00048	0.012	0.418
25	0.00048	0.010	0.501
26	0.00048	0.008	0.627
27	0.00048	0.006	0.835
28	0.00048	0.005	1.003
29	0.00048	0.015	0.334
30	0.00048	0.012	0.418
31	0.00048	0.014	0.358
32	0.00048	0.011	0.456
33	0.00048	0.010	0.501
34	0.00048	0.007	0.716
35	0.00048	0.005	1.003
36	0.00048	0.012	0.418
37	0.00048	0.013	0.386
38	0.00048	0.014	0.358
39	0.00048	0.009	0.557
40	0.00048	0.011	0.456
41	0.00048	0.007	0.716
42	0.00048	0.005	1.003
43	0.00048	0.012	0.418
44	0.00048	0.016	0.313
45	0.00048	0.013	0.386
46	0.00048	0.011	0.456
47	0.00048	0.012	0.418

48	0.00048	0.010	0.501
49	0.00048	0.007	0.716
50	0.00048	0.012	0.418
51	0.00048	0.015	0.334
52	0.00048	0.012	0.418
53	0.00048	0.014	0.358
54	0.00048	0.015	0.334
55	0.00048	0.013	0.386
56	0.00048	0.010	0.501
57	0.00048	0.020	0.251
58	0.00048	0.014	0.358
59	0.00048	0.012	0.418
60	0.00048	0.009	0.557
61	0.00048	0.011	0.456
62	0.00048	0.011	0.456
63	0.00048	0.008	0.627
64	0.00048	0.009	0.557
65	0.00048	0.012	0.418
66	0.00048	0.013	0.386
67	0.00048	0.016	0.313
68	0.00048	0.011	0.456
69	0.00048	0.011	0.456
70	0.00048	0.007	0.716
71	0.00048	0.010	0.501
72	0.00048	0.012	0.418
73	0.00048	0.015	0.334
74	0.00048	0.012	0.418
75	0.00048	0.010	0.501
76	0.00048	0.009	0.557
77	0.00048	0.006	0.835
78	0.00048	0.007	0.716
79	0.00048	0.012	0.418
80	0.00048	0.013	0.386
81	0.00048	0.012	0.418
82	0.00048	0.011	0.456
83	0.00048	0.013	0.386
84	0.00048	0.009	0.557

FUENTE: *Elaboración Propia*

4.1.5. Gráfico de Perfiles de Flujo

A continuación, se muestra gráficos que contienen el perfil del flujo que se observó en los ensayos, generadas a partir de las mediciones de los tirantes.

➤ Para Prototipo 01 (17.5x10cm)

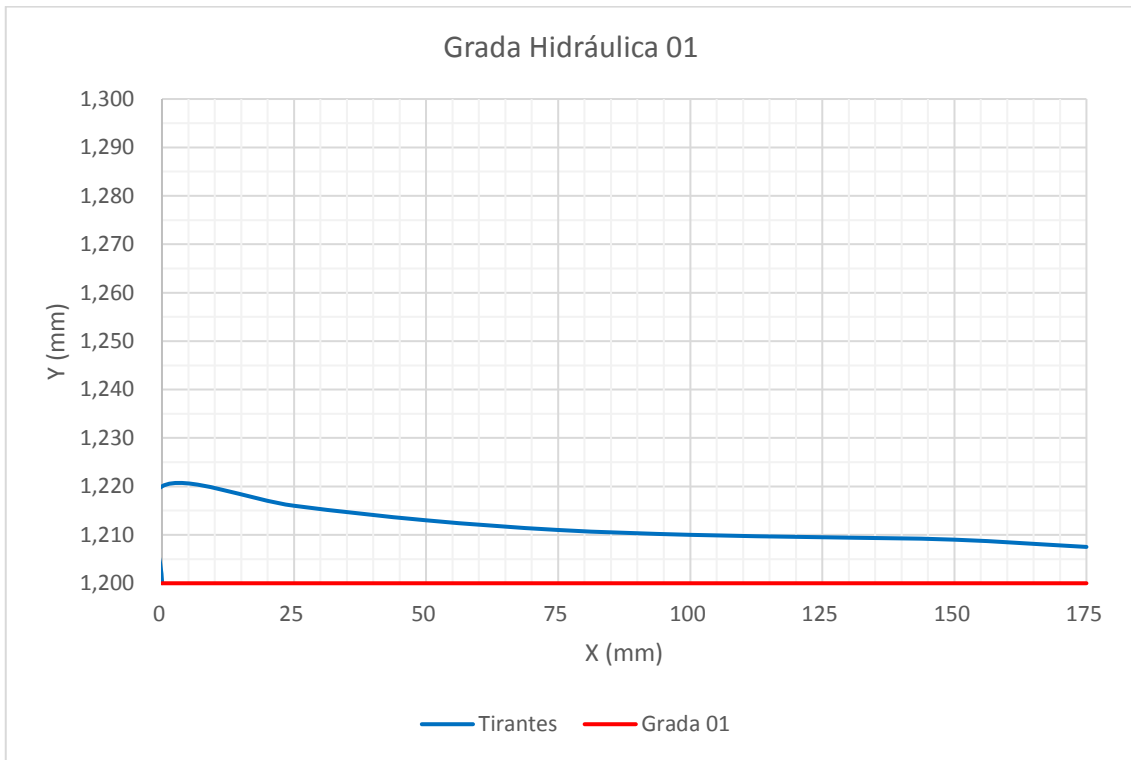


Figura 35. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 01 Prototipo 01
Fuente: Elaboración Propia

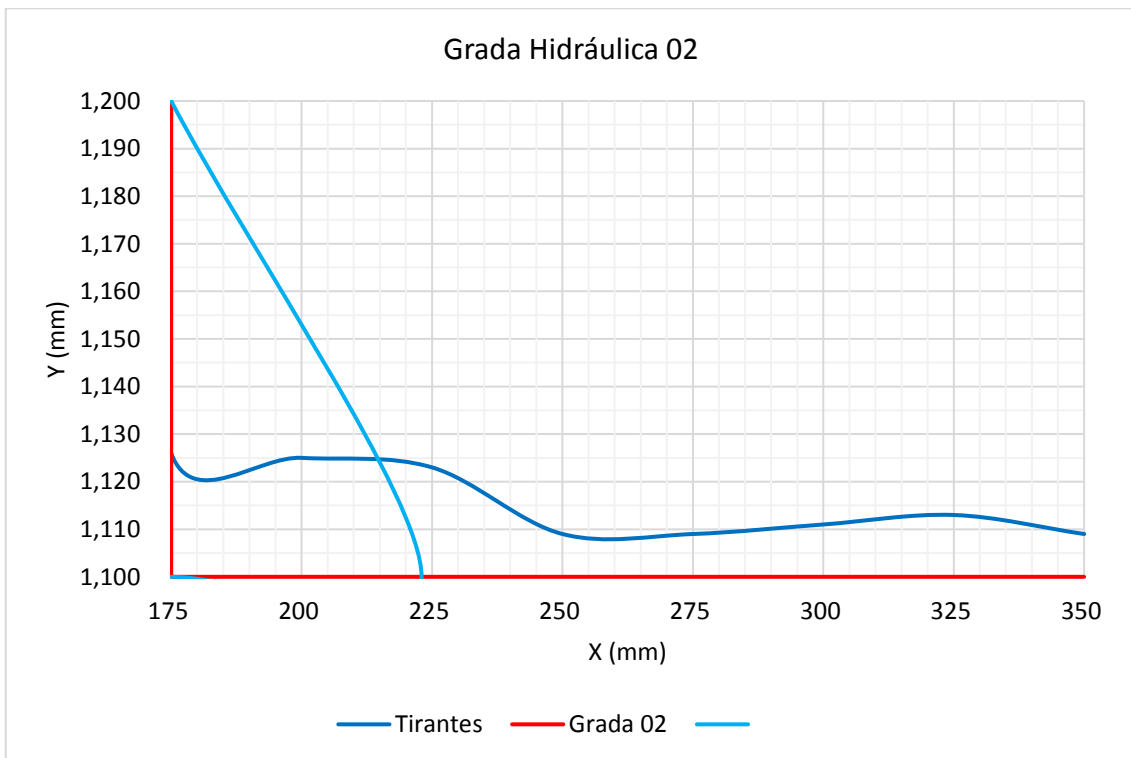


Figura 36. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 02 Prototipo 01
Fuente: Elaboración Propia

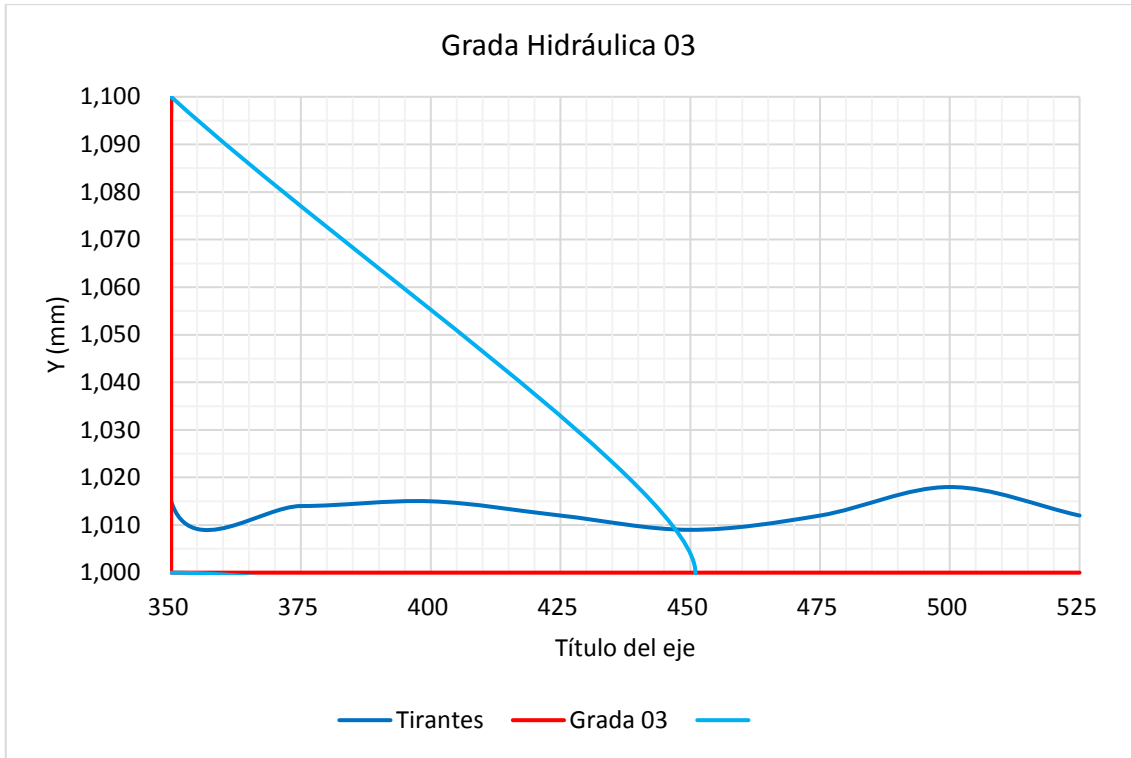


Figura 37. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 03 Prototipo 01
Fuente: Elaboración Propia

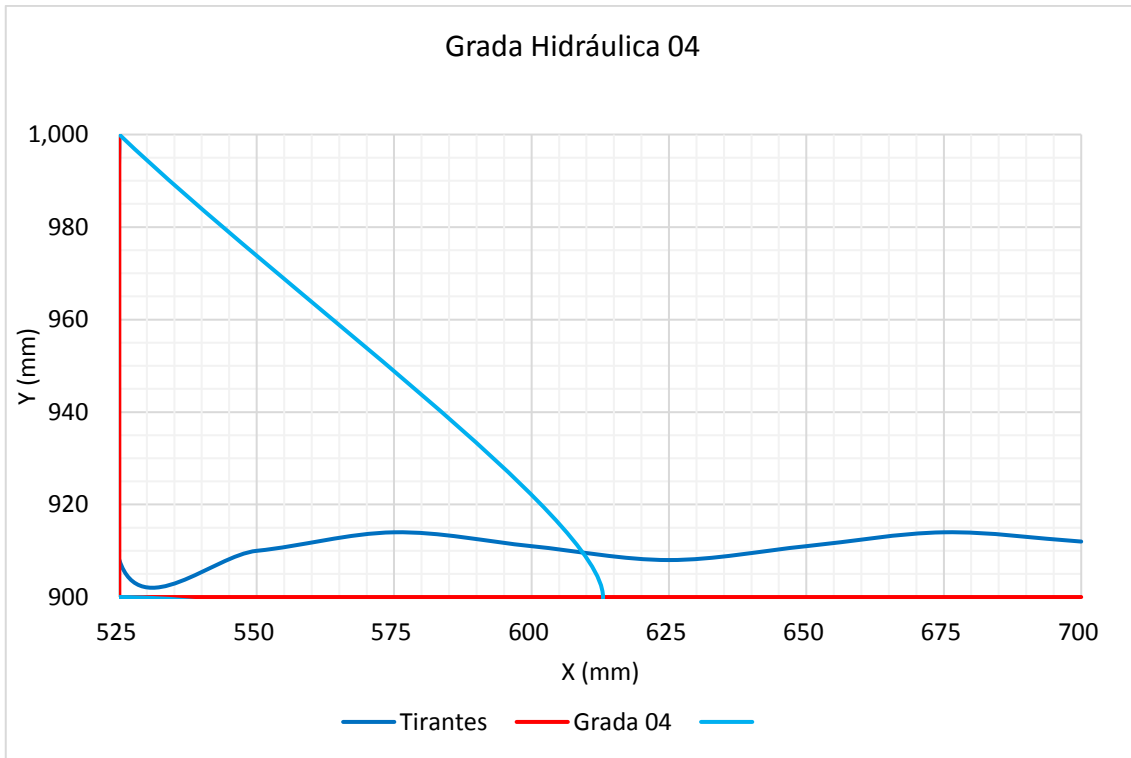


Figura 38. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 04 Prototipo 01
Fuente: Elaboración Propia

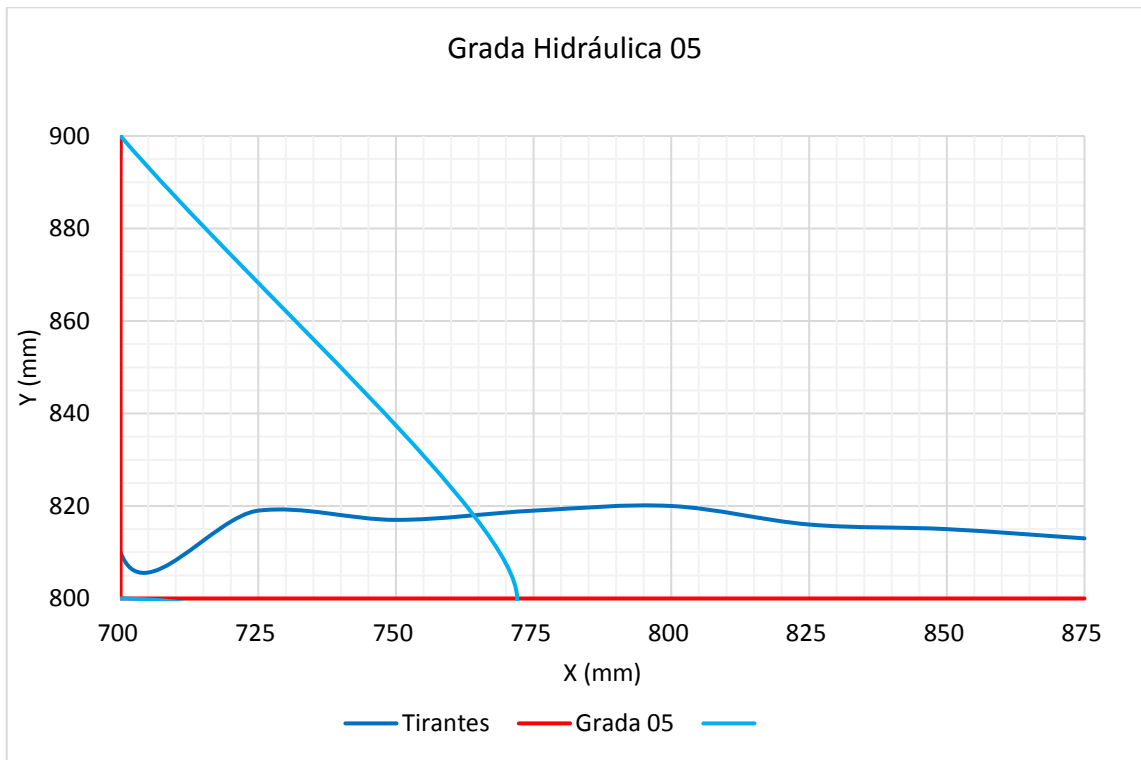


Figura 39. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 05 Prototipo 01
Fuente: Elaboración Propia

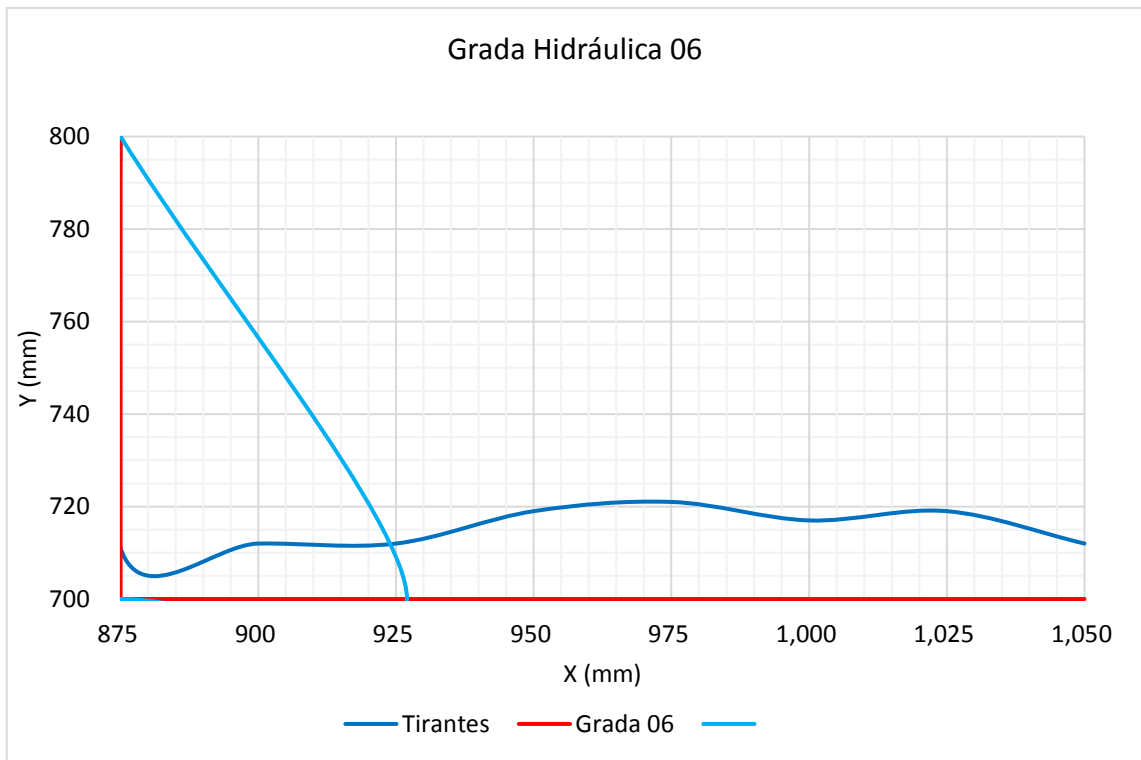


Figura 40. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 06 Prototipo 01
Fuente: Elaboración Propia

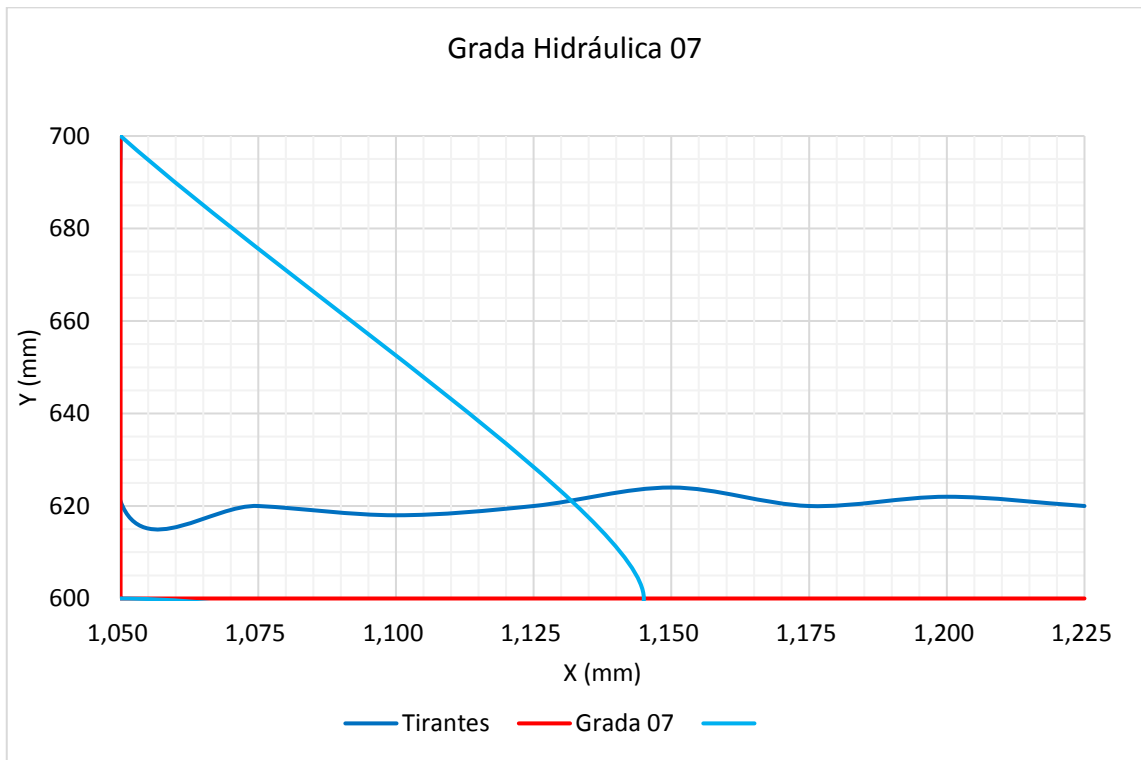


Figura 41. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 07 Prototipo 01
Fuente: Elaboración Propia

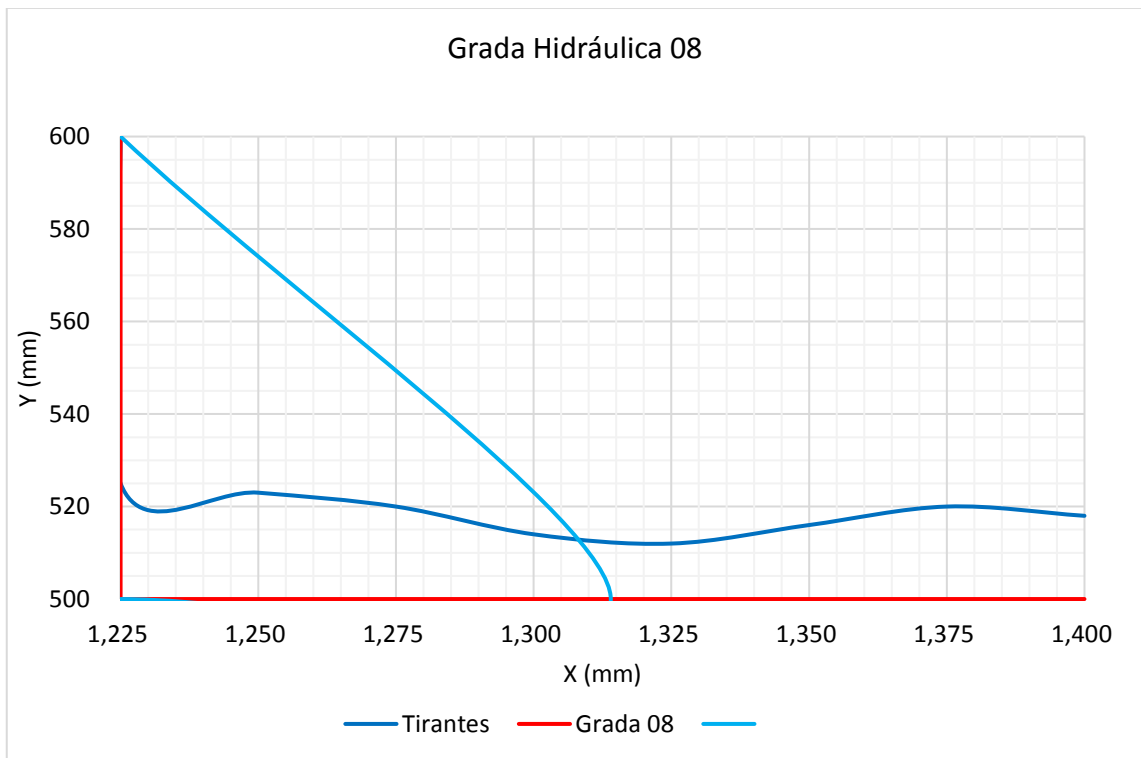


Figura 42. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 08 Prototipo 01
Fuente: Elaboración Propia

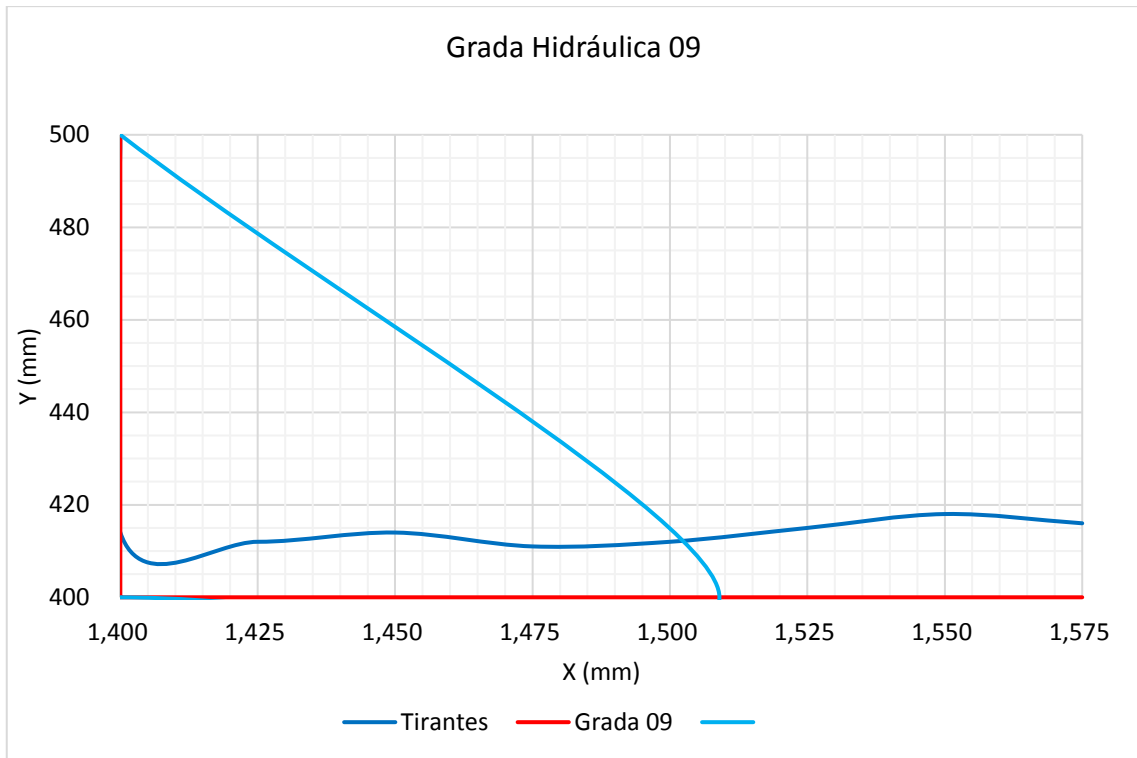


Figura 43. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 09 Prototipo 01
Fuente: Elaboración Propia

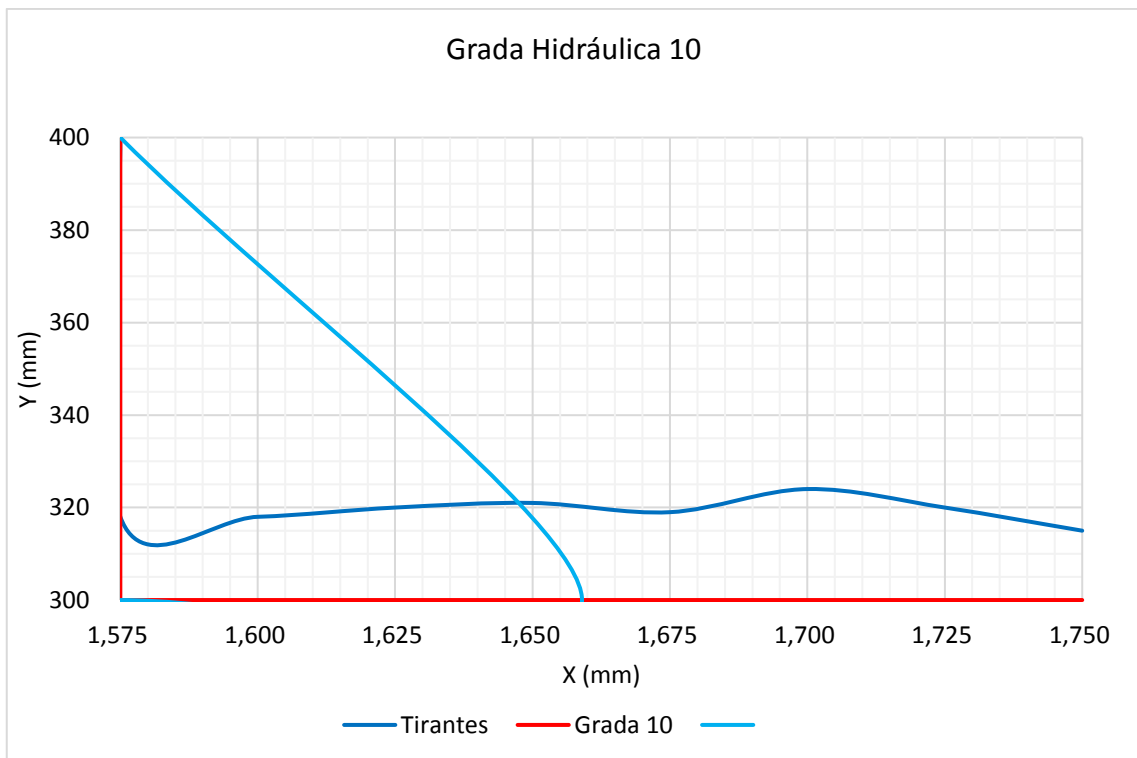


Figura 44. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 10 Prototipo 01
Fuente: Elaboración Propia

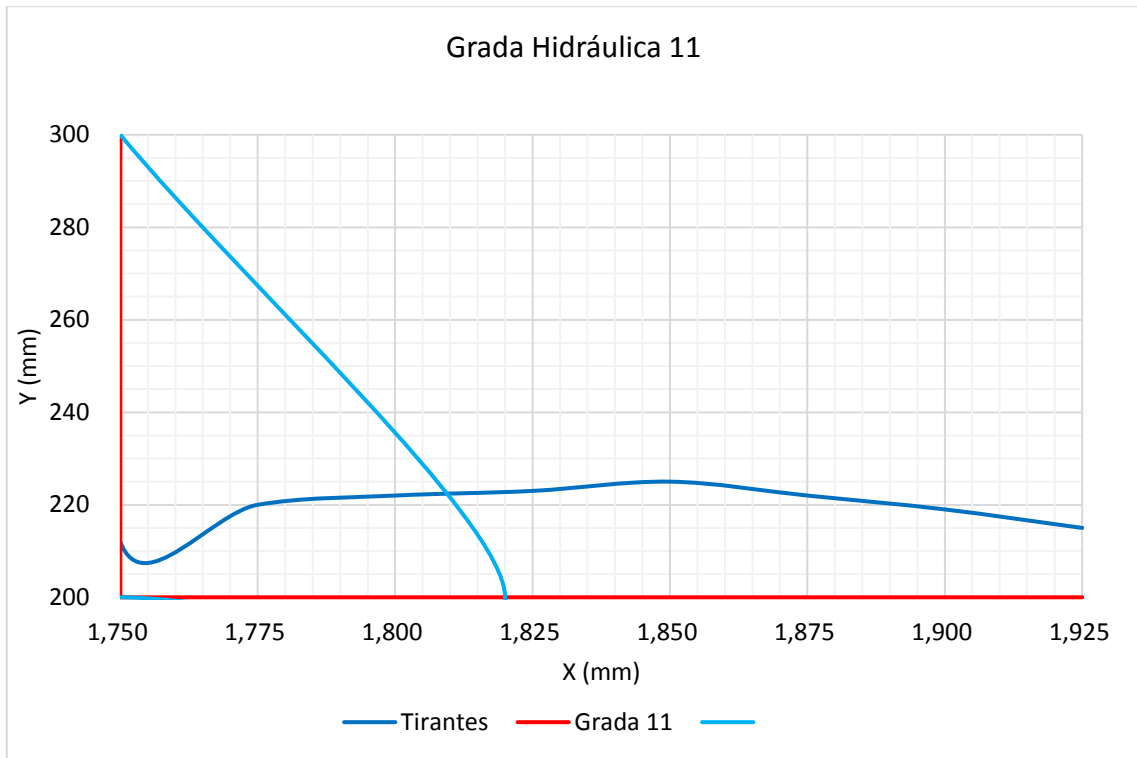


Figura 45. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 11 Prototipo 01

Fuente: Elaboración Propia

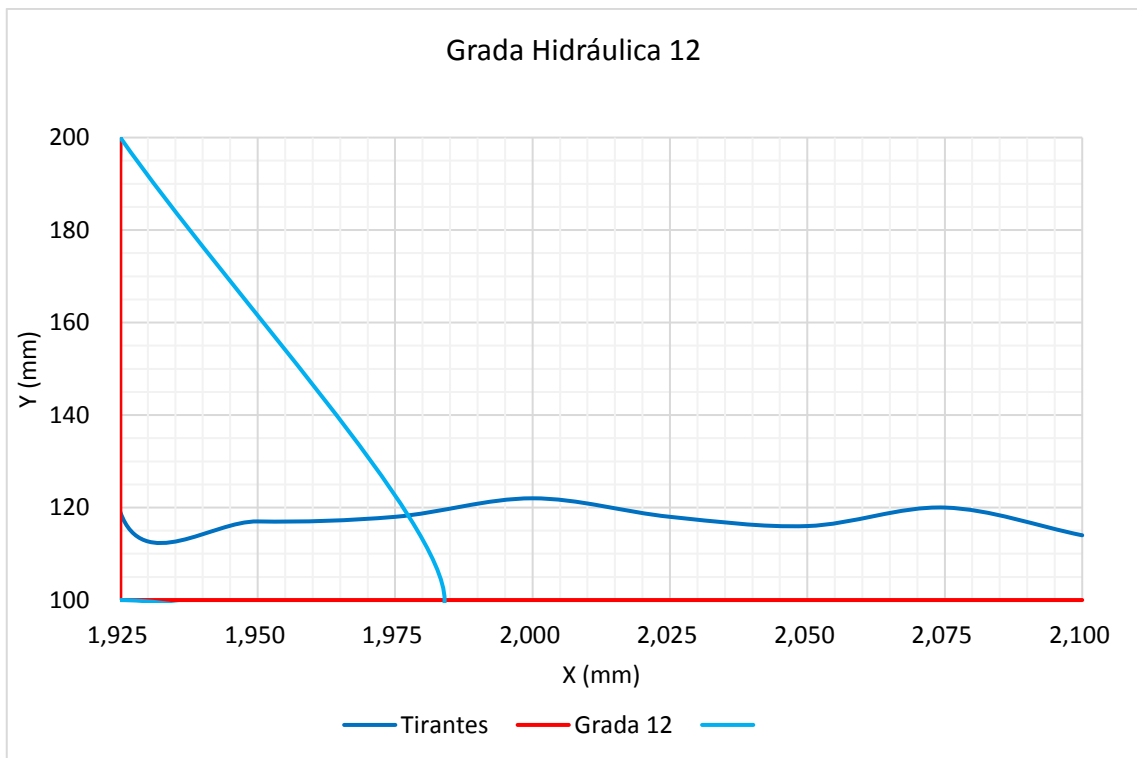


Figura 46. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 12 Prototipo 01

Fuente: Elaboración Propia

➤ Para Prototipo 02 (15x10cm)

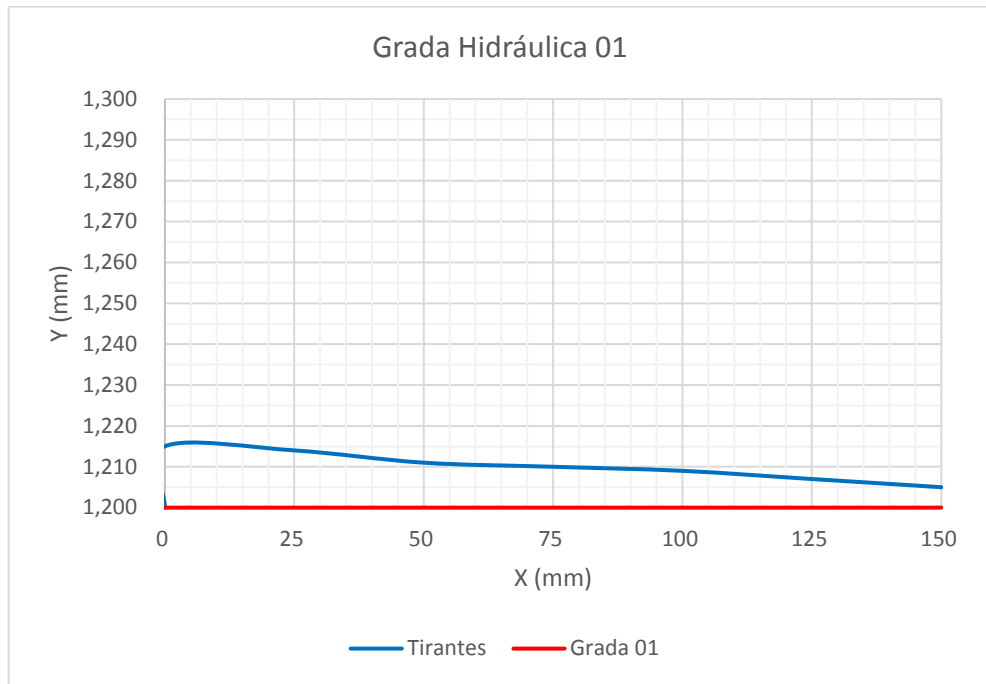


Figura 47. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 01 Prototipo 02

Fuente: Elaboración Propia

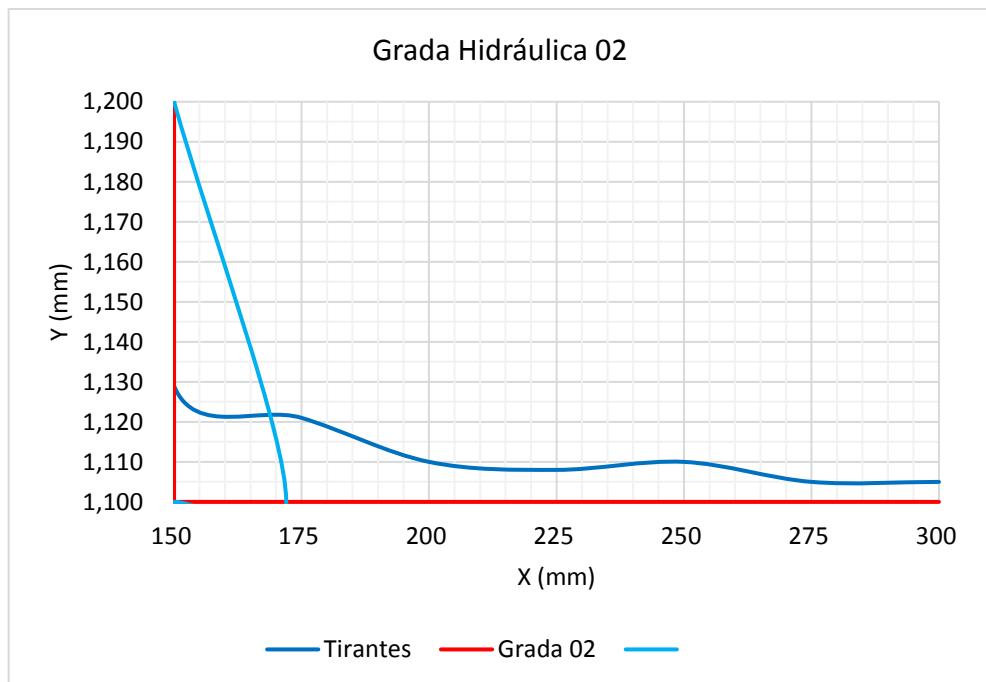


Figura 48. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 02 Prototipo 02

Fuente: Elaboración Propia

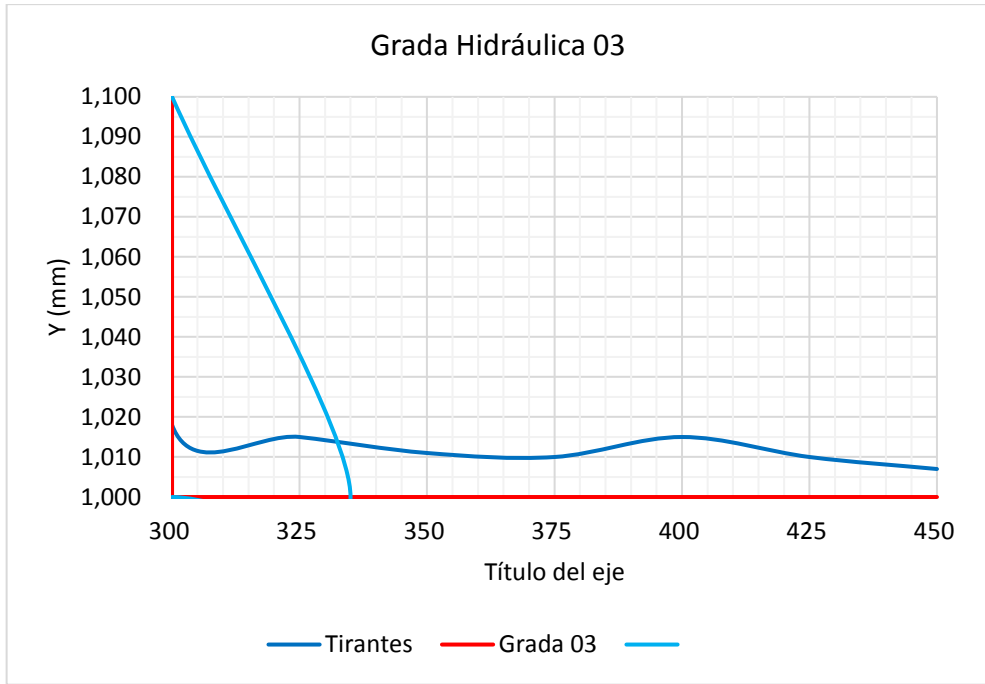


Figura 49. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 03 Prototipo 02
Fuente: Elaboración Propia

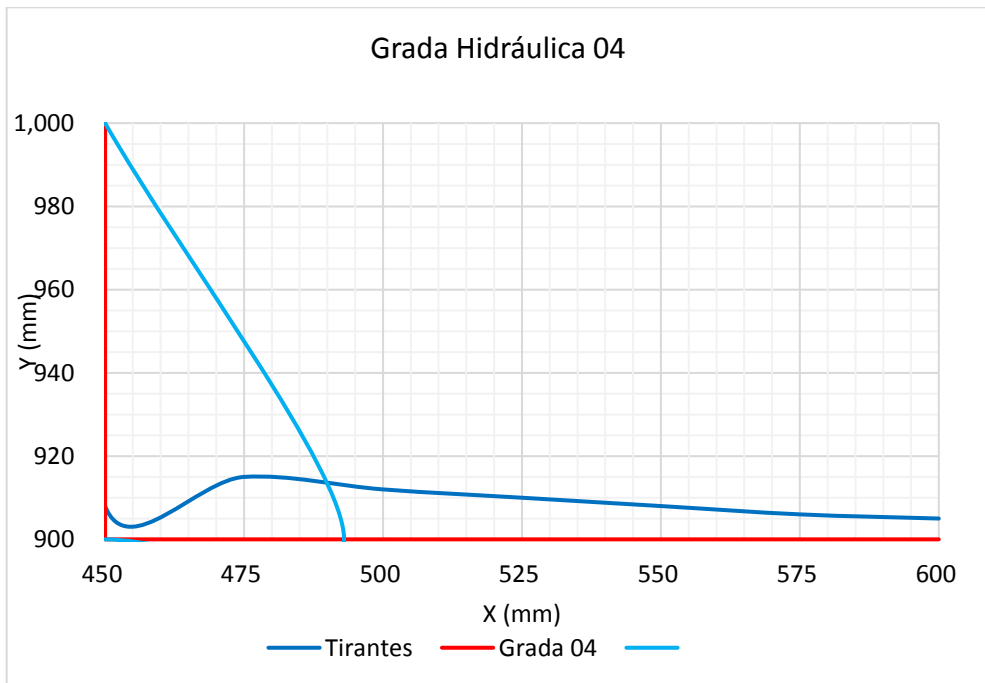


Figura 50. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 04 Prototipo 02
Fuente: Elaboración Propia

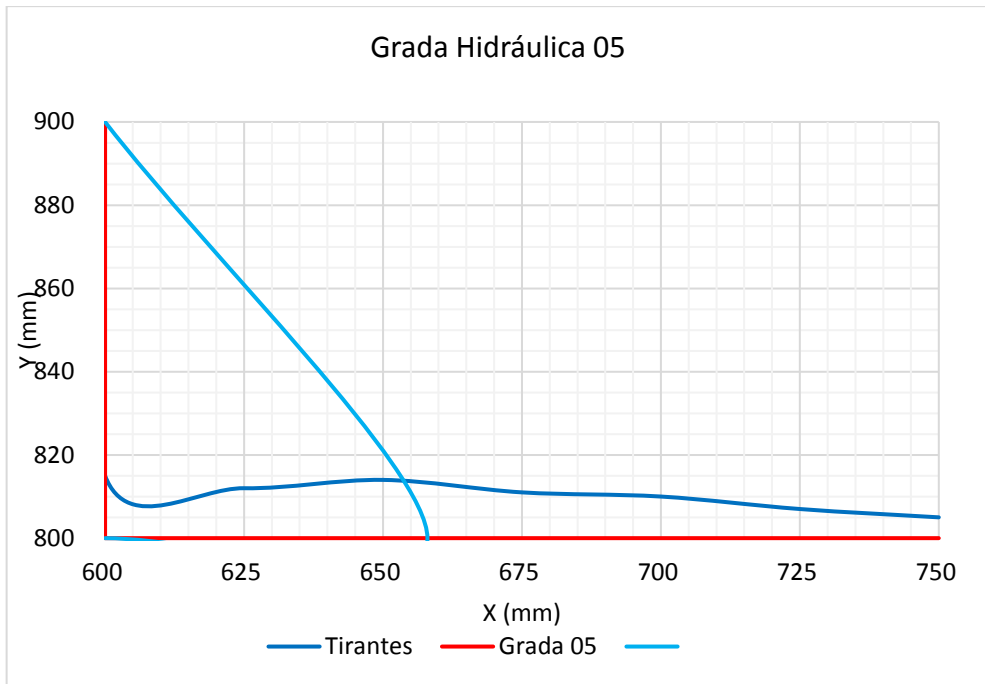


Figura 51. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 05 Prototipo 02
Fuente: Elaboración Propia

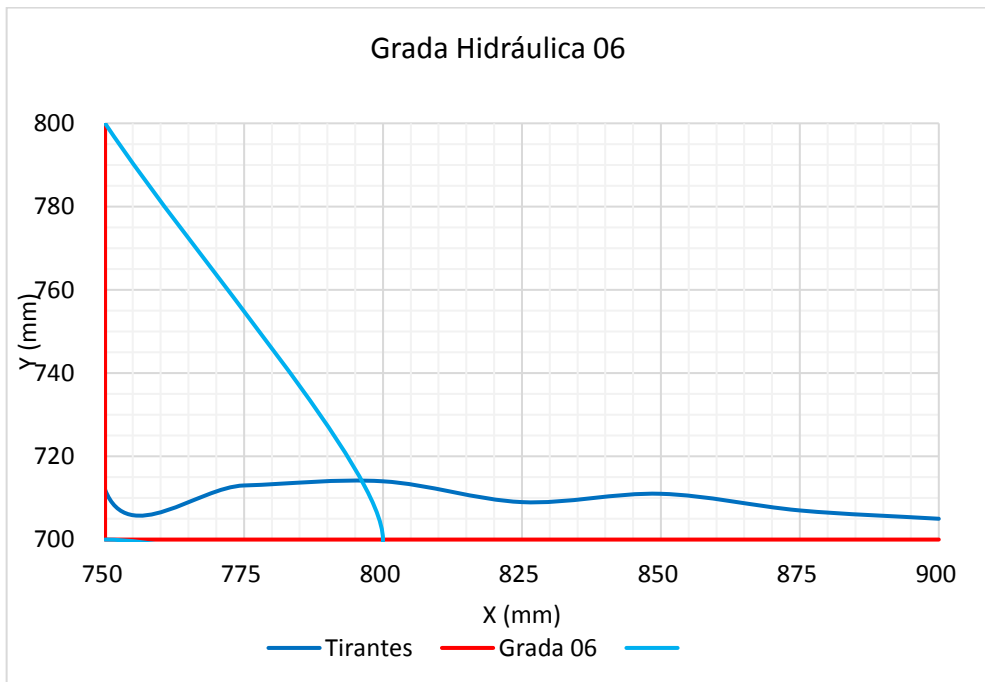


Figura 52. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 06 Prototipo 02
Fuente: Elaboración Propia

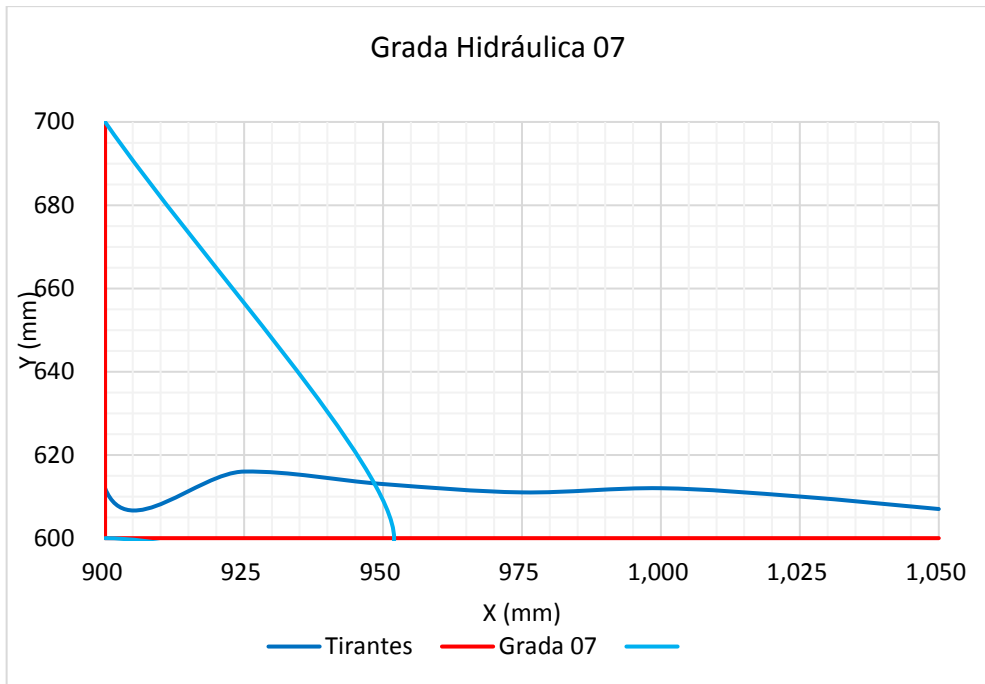


Figura 53. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 07 Prototipo 02
Fuente: Elaboración Propia

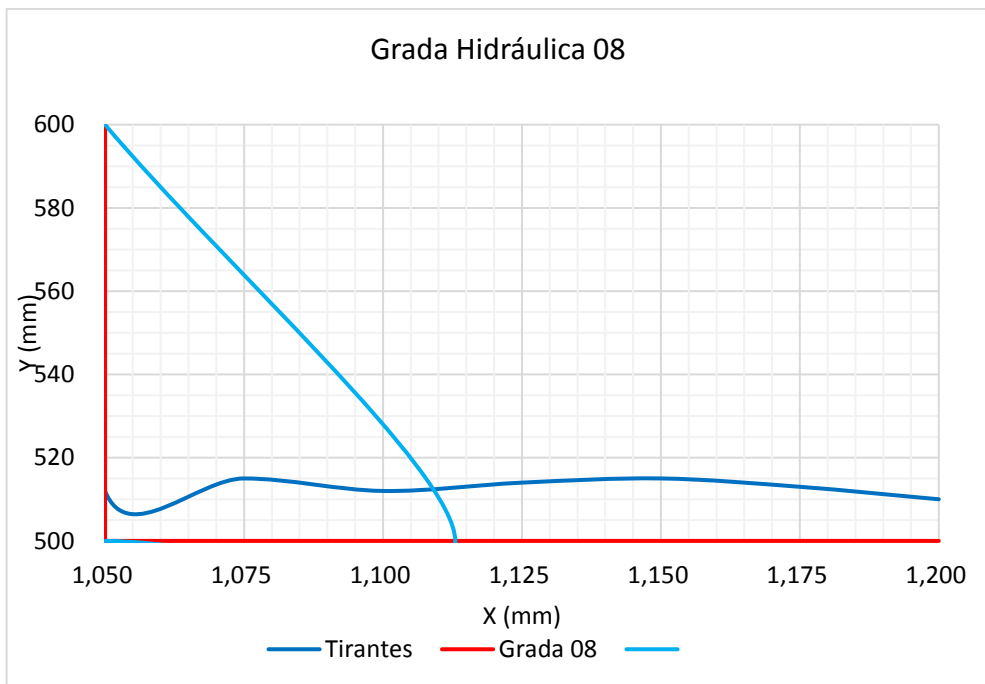


Figura 54. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 08 Prototipo 02
Fuente: Elaboración Propia

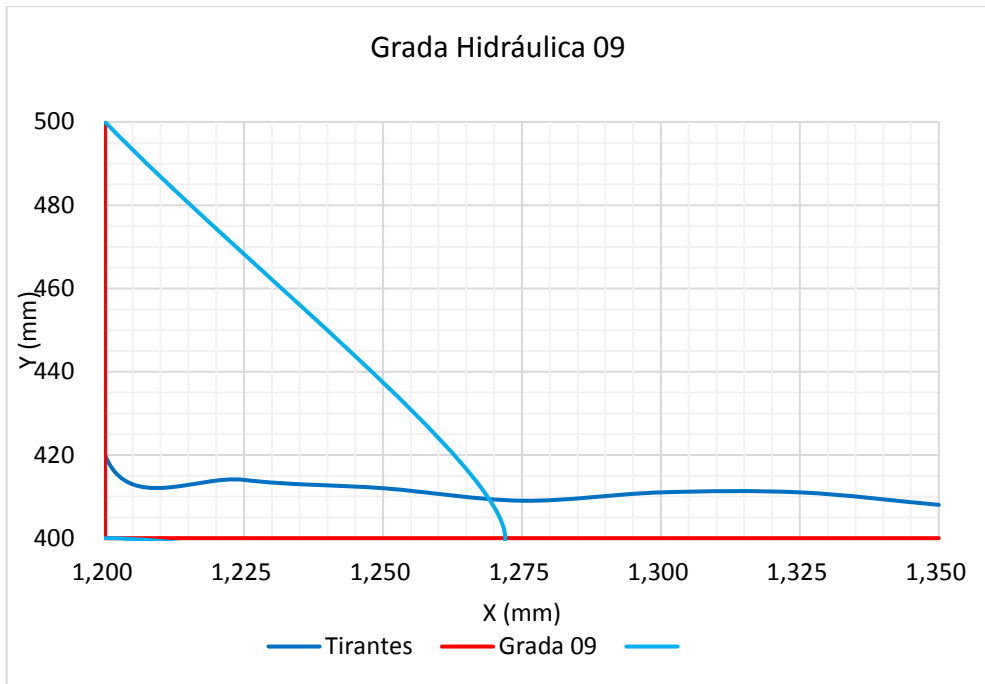


Figura 55. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 09 Prototipo 02
Fuente: Elaboración Propia

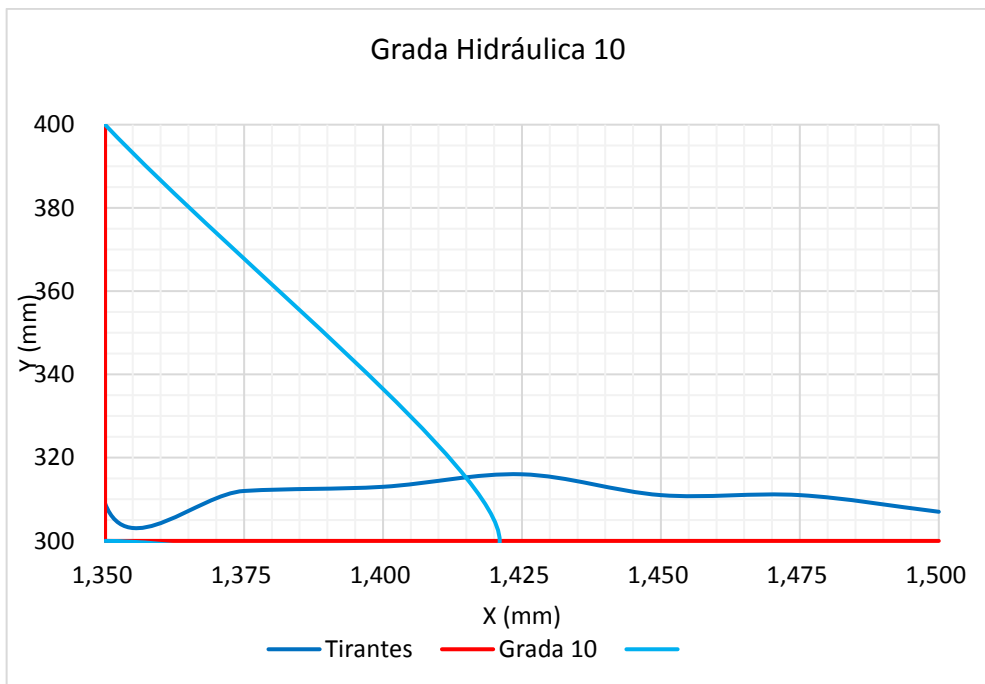


Figura 56. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 10 Prototipo 02
Fuente: Elaboración Propia

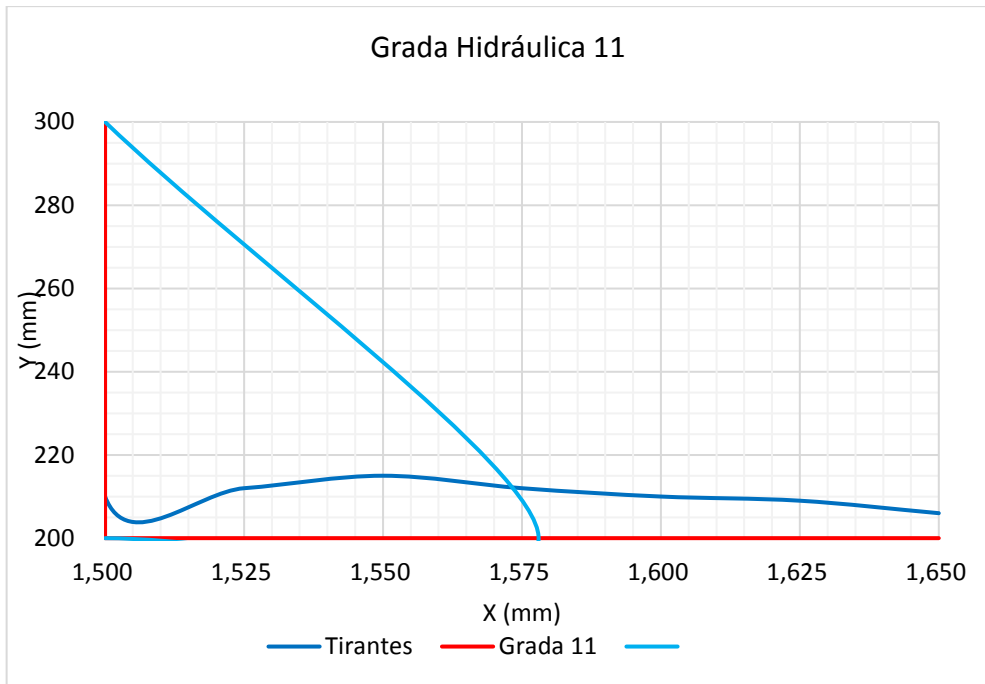


Figura 57. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 11 Prototipo 02
Fuente: Elaboración Propia

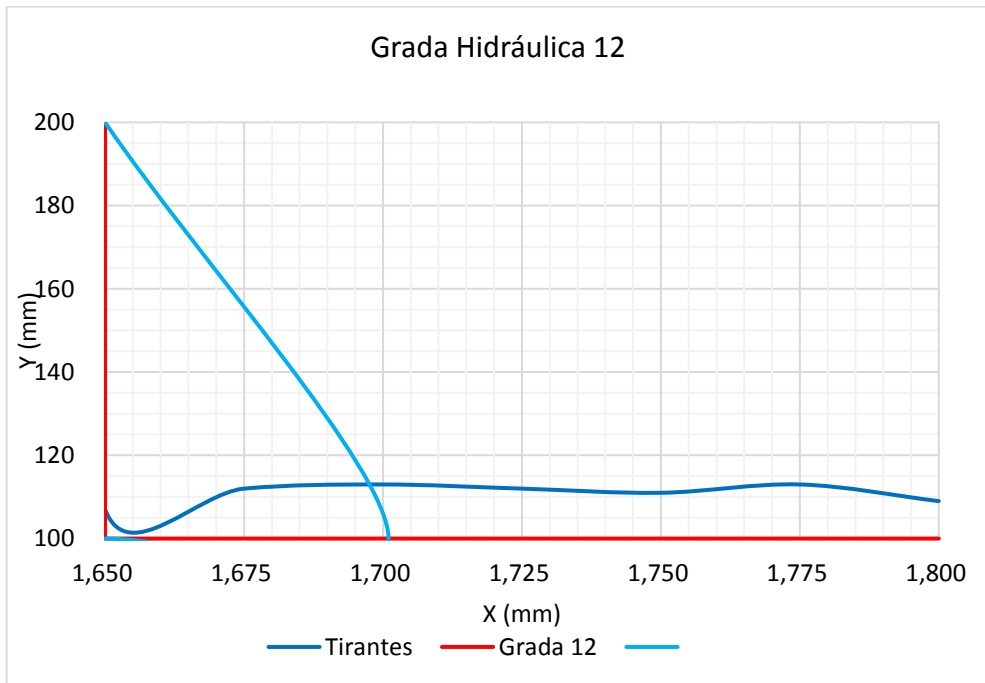


Figura 58. Perfil del Flujo - Grada Hidráulica 12 Prototipo 02
Fuente: Elaboración Propia

4.6. Disipación de Energía en Prototipos

Dónde:

y_1 = tirante 1

y_2 = tirante 2

V_1 = Velocidad antes de la formación del resalto

E_1 = Energía específica antes del resalto

V_2 = Velocidad luego del resalto

E_2 = Energía específica después del resalto

ΔE = Pérdida de energía

$$E = \frac{Vn^2}{2g} + yn$$

➤ Prototipo 01 (escalones 0.175x0.10m)

Tabla 6. Pérdida de Energía - Prototipo 01

N°	y_1 (m)	y_2 (m)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	E_1 (m)	E_2 (m)	ΔE (m)
1	-	-	-	-	-	-	-
2	0.009	0.013	0.56	0.39	0.025	0.021	0.004
3	0.009	0.018	0.56	0.28	0.025	0.022	0.003
4	0.011	0.014	0.46	0.36	0.022	0.021	0.001
5	0.017	0.020	0.29	0.25	0.021	0.023	-0.002
6	0.012	0.021	0.42	0.24	0.021	0.024	-0.003
7	0.018	0.024	0.28	0.21	0.022	0.026	-0.004
8	0.012	0.020	0.42	0.25	0.021	0.023	-0.002
9	0.011	0.018	0.46	0.28	0.022	0.022	0.000
10	0.019	0.024	0.26	0.21	0.023	0.026	-0.004
11	0.021	0.025	0.24	0.20	0.024	0.027	-0.003
12	0.017	0.022	0.29	0.23	0.021	0.025	-0.003

FUENTE: Elaboración Propia

➤ Prototipo 02 (escalones 0.15x0.10m)

Tabla 7. Pérdida de Energía - Prototipo 02

N°	y_1 (m)	y_2 (m)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	E_1 (m)	E_2 (m)
1	-	-				
2	0.008	0.010	0.63	0.50	0.028	0.023
3	0.010	0.015	0.50	0.33	0.023	0.021

4	0.007	0.015	0.72	0.33	0.033	0.021
5	0.010	0.014	0.50	0.36	0.023	0.021
6	0.009	0.011	0.56	0.46	0.025	0.022
7	0.011	0.012	0.46	0.42	0.022	0.021
8	0.012	0.015	0.42	0.33	0.021	0.021
9	0.009	0.011	0.56	0.46	0.025	0.022
10	0.013	0.016	0.39	0.31	0.021	0.021
11	0.010	0.015	0.50	0.33	0.023	0.021
12	0.008	0.013	0.63	0.39	0.028	0.021

FUENTE: *Elaboración Propia*

4.7. Curva de Energía Específica en Prototipos

- Prototipo 01 (escalones 0.175x0.10m)

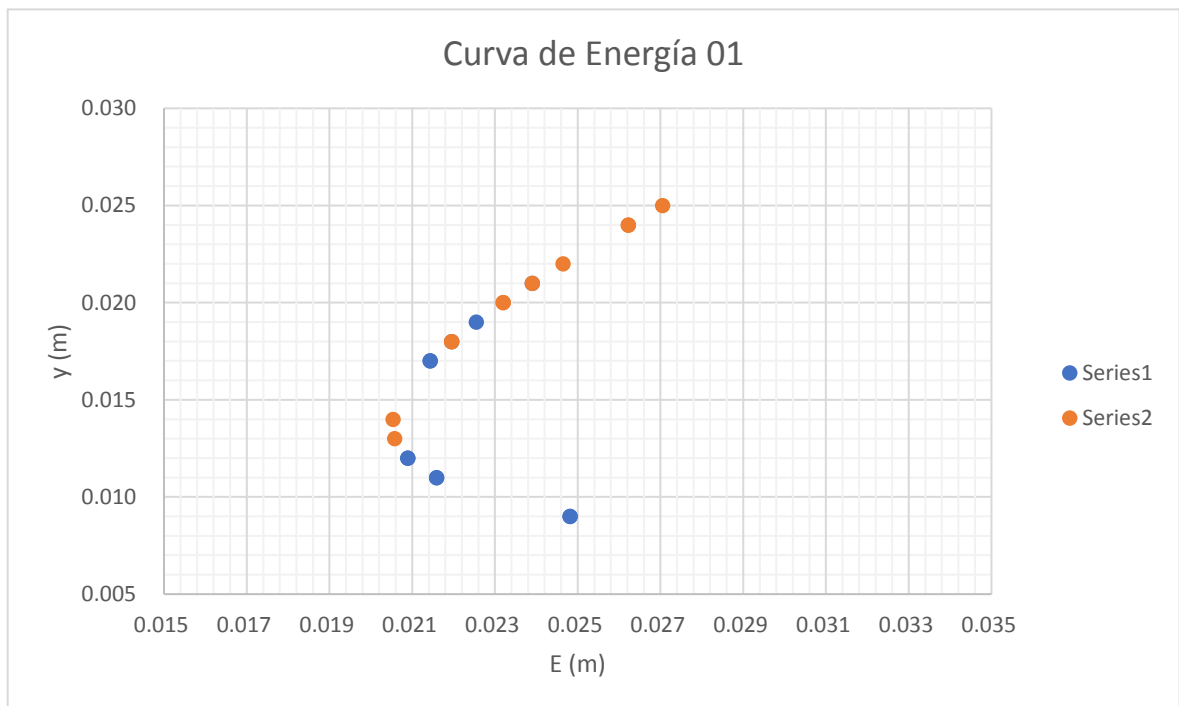


Figura 59. Curva de Energía Prototipo 01

Fuente: *Elaboración Propia*

- Prototipo 02 (escalones 0.15x0.10m)

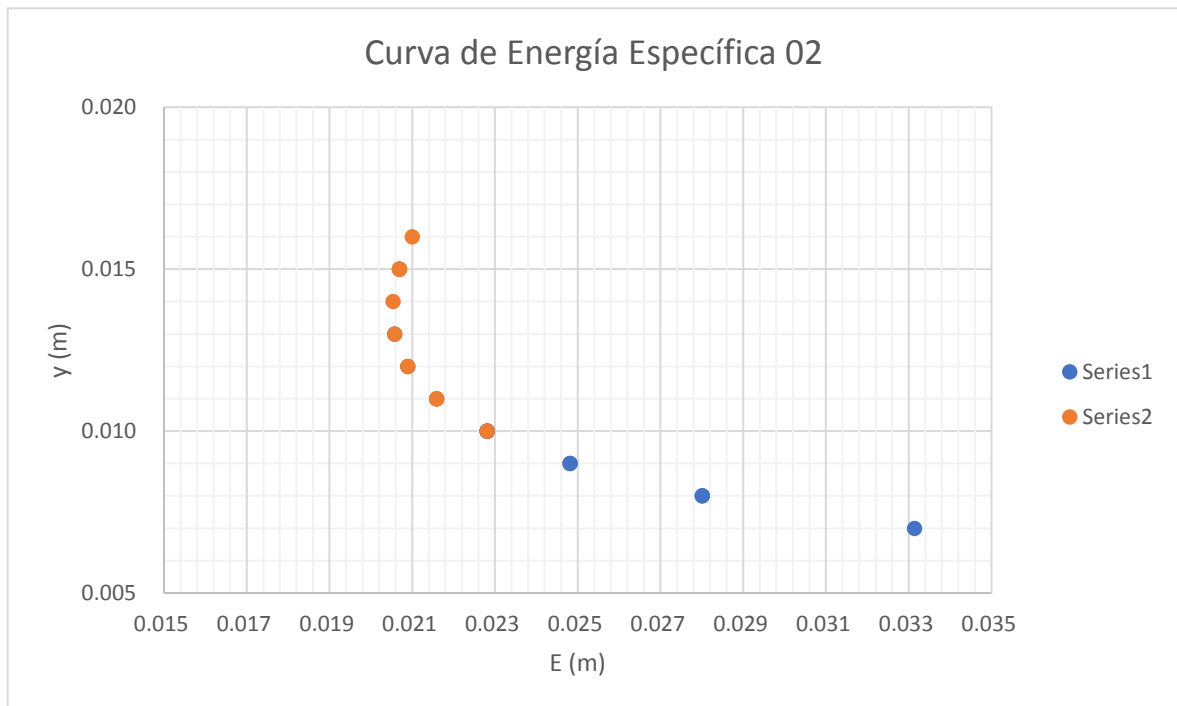


Figura 60. Curva de Energía Prototipo 02

Fuente: Elaboración Propia

4.2. Modelación Numérica (Analítica)

Con el fin de comparar el comportamiento hidráulico del modelo físico experimental, se implementó el modelo numérico usando el software Flow 3D, en el cual se utilizará la misma geometría del modelo físico, mejorando la geometría y características hidráulicas.

4.2.1. Construcción de la Geometría del Vertedero Escalonado

El proceso de diseño hidráulico de la estructura requiere del uso de herramientas CAD con el cual se pueda realizar la modelación en tres dimensiones de la geometría, para esto se procedió primero a dibujar la estructura usando el software SketchUp 2017 para su rápido diseño, una vez diseñado la geometría, este se tiene que exportar en un formato compatible con el Flow 3D, para este caso es el formato “.stl”. como bloque sólido.

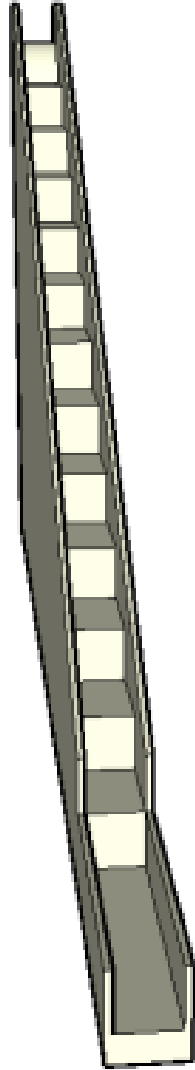


Figura 61. Modelo a escala real de Prototipo 01, escalón de 3.50x2.00m

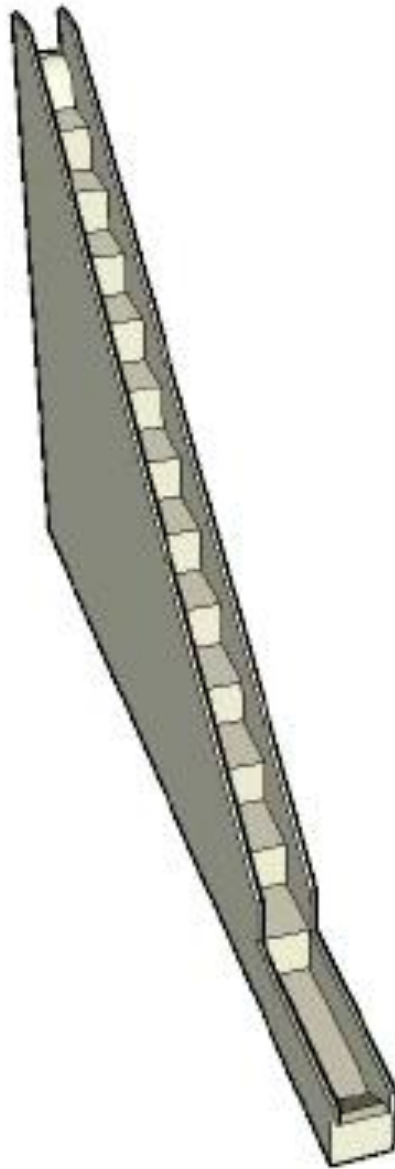


Figura 62. Modelo a escala real de Prototipo 02, escalón de 3.00x2.00m

4.2.2. Mallado de Estructura

Para modelar la geometría de la estructura del vertedero escalonado, se utilizó un enmallado ortogonal para delimitar la estructura en sus 3 direcciones. Este paso inicial solo es para delimitar la sección geométrica, pero para iniciar la simulación

es necesario calibrar la malla para mejorar la estabilidad de la estructura y asegurar la continuidad del gasto durante la simulación, esto se logra aumentando la precisión de la malla.

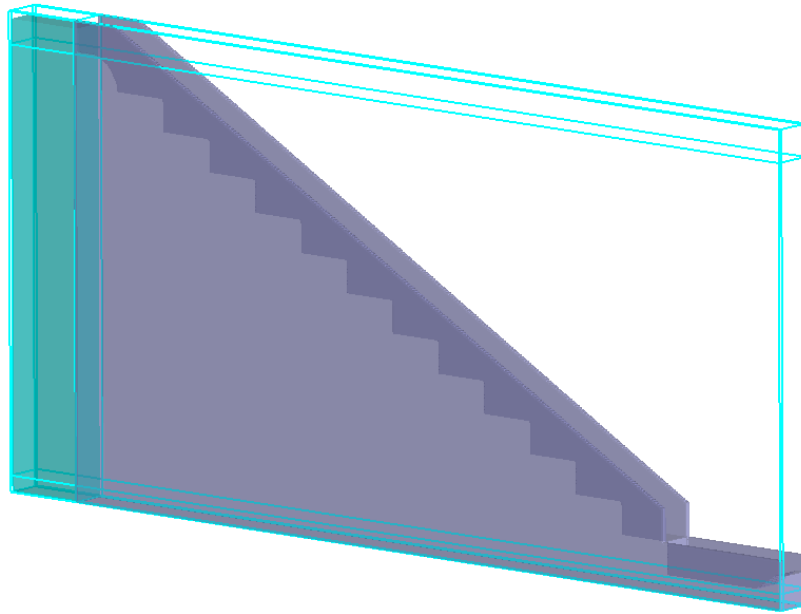


Figura 63. MP01-3.50x2.00x2.00 m.

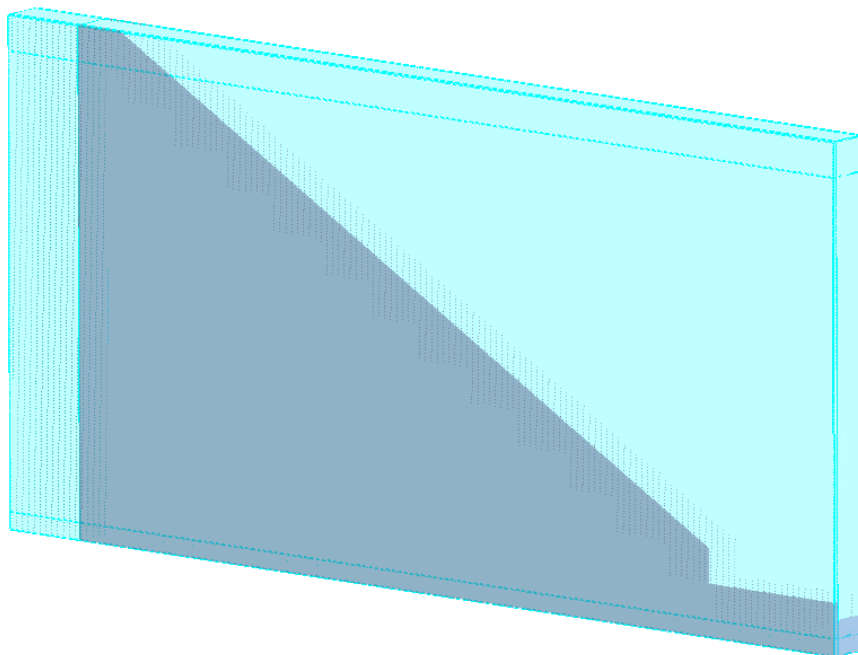


Figura 64. MP01-3.00x2.00x2.00 m.

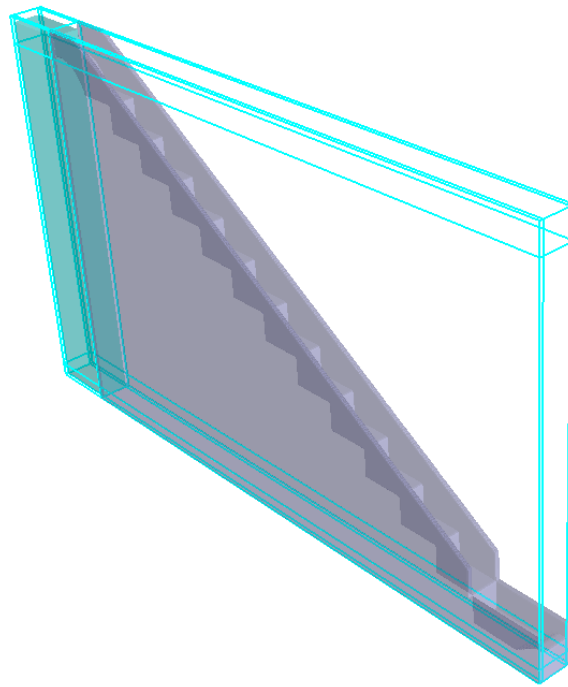


Figura 65. MP02-3.00x2.00x2.00 m.

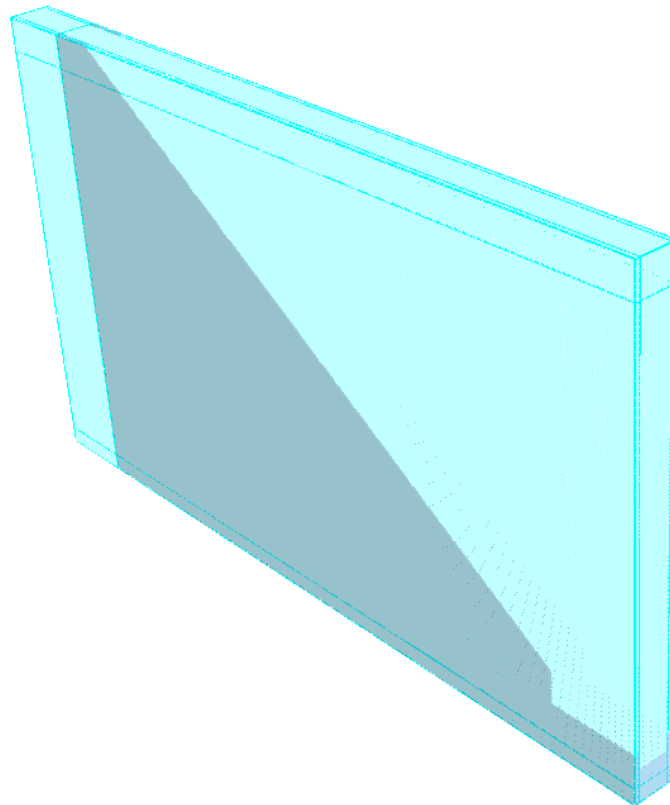


Figura 66. MP02-3.00x2.00x2.00 m.

4.2.3. Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera se colocarán para cada una de las 3 mallas con las que se delimito la estructura en el modelo.

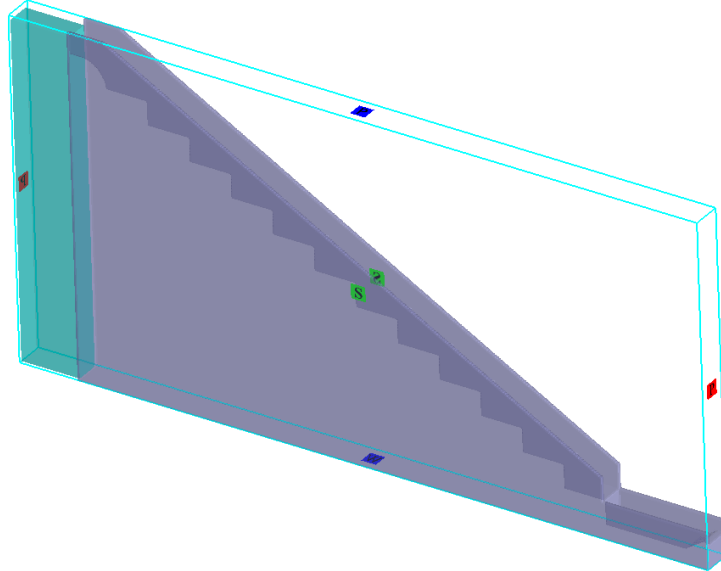


Figura 67. MP01-3.50x2.00x2.00 m.

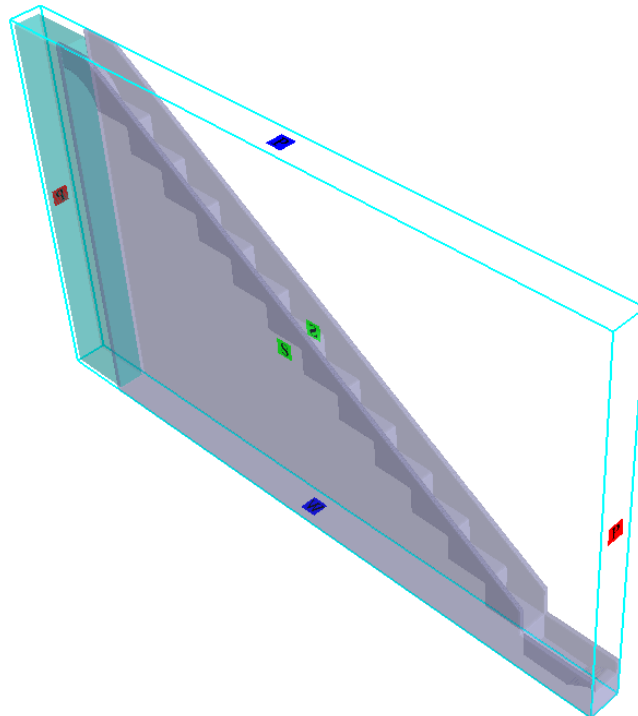


Figura 68. MP02-3.00x2.00x2.00 m.

P= Presión Especifica (Specified Pressure).

O= Salida de Flujo (Out flow).

S= Simetría (Symetry).

I= Interface (Interface).

W= Muro (Wall).

El programa te permite imponer un caudal aguas arriba, pero en la simulación se optó por utilizar la condición de borde Specified Pressure (Presión Especifica) ya que nos arrojó resultados más estables.

4.2.4. Condiciones iniciales

Para realizar el modelado de la simulación es necesario poner una condición de flujo, el cual es limitar la sección de llenado con fluido, el cual tendrá velocidad nula hasta la cota máxima del embalse. Para comprobar esta condición se realizó una simulación en el cual se le agrega velocidad al fluido en la sección de llenado, comprobando que la condición aplicada logra estabilizarse más rápido que agregando velocidad al fluido en la sección de llenado. De esta forma la condición de inicio con velocidad nula resulta ser la condición óptima para el proceso de vaciado de la sección donde se almacena el fluido.

4.2.5. Simulación

Ya una vez desarrollado los pasos anteriores, se procederá al inicio de la simulación, partiendo de la condición de reposo. Al empezar la simulación, el flujo del fluido empieza a correr de forma rápida hacia el primer escalón del vertedero. Lo que se observa es que el flujo empieza a caer aguas abajo con variaciones notables en su comportamiento, desarrollando distintos tipos de flujos, donde se observa un flujo de escalón a escalón con un salto completamente desarrollado, parcialmente desarrollado.

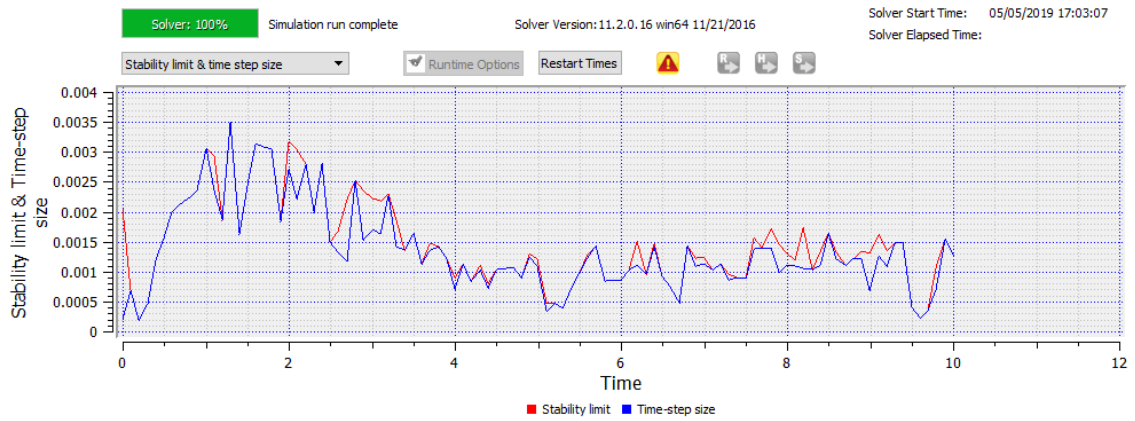


Figura 69. MP01-3.50x2.00x2.00 m.

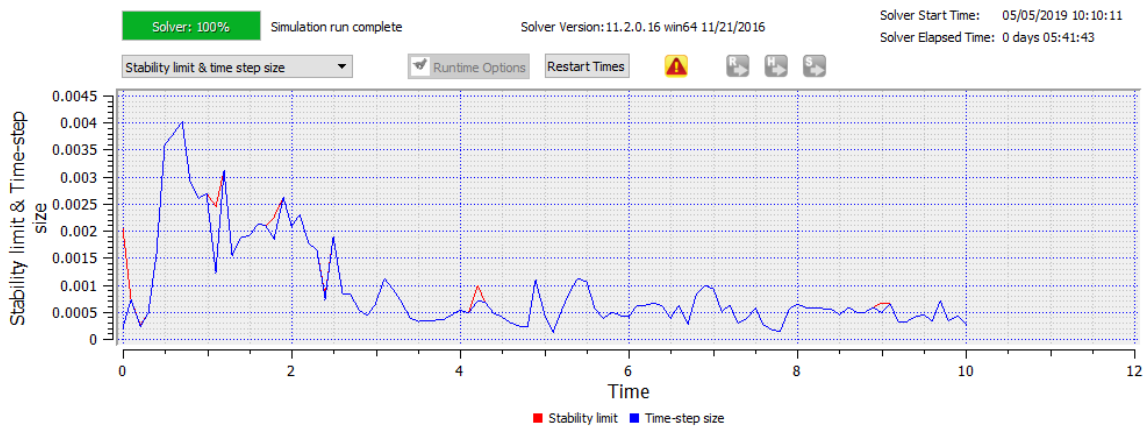


Figura 70. MP02-3.00x2.00x2.00 m.

4.2.6. Resultados de modelación Numérico

4.2.6.1. Presiones en el Vertedero Escalonado

Las presiones que se observan en la simulación para un caudal de $Q=4.50 \text{ m}^3/\text{s}$ en el vertedero escalonado que son desde $P_{\text{mín}}= -20817 \text{ Pa}$ (-2.1228 mca) y hasta $P_{\text{máx}}= 279172 \text{ Pa}$ (28.4684 mca). La presión en el colchón disipador es de $P= 15.8 \text{ Pa}$ (0.0016 mca).

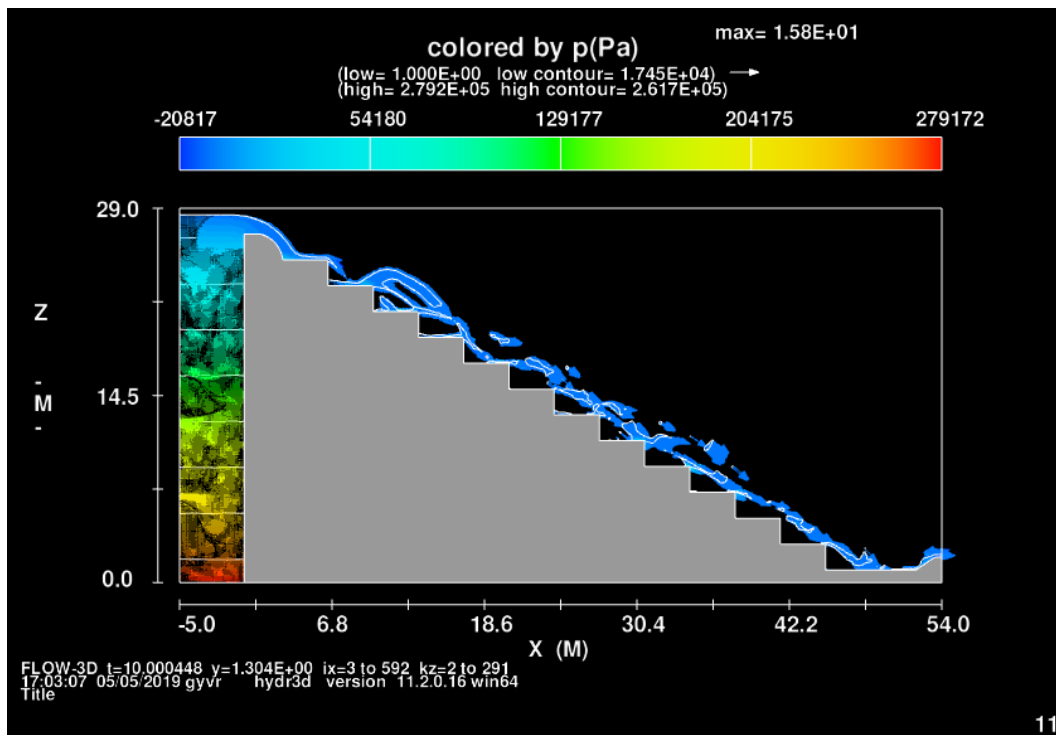


Figura 71. Vista de Perfil del vertedero escalonado MP-01 con presiones para un caudal de 4.50 m³/s.

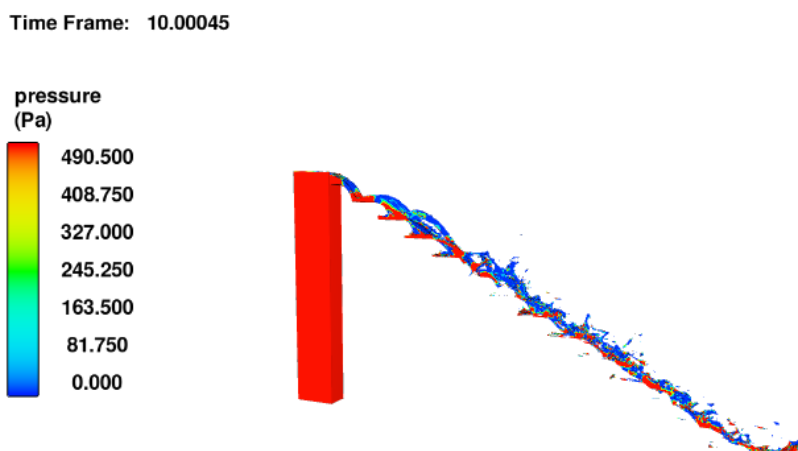


Figura 72. Vista de Perfil en 3D del vertedero escalonado MP-01 con presiones para un caudal de 4.50 m³/s.

Las presiones en el vertedero escalonado MP-02 A con caudal $Q= 4.50 \text{ m}^3/\text{s}$ son desde $P_{\text{mín}}= 921 \text{ Pa}$ (0.0939 mca). Y $P_{\text{máx}}=13194 \text{ Pa}$ (1.345 mca). La presión en el colchón disipador es $P= 307.5 \text{ Pa}$ (0.0314 mca).

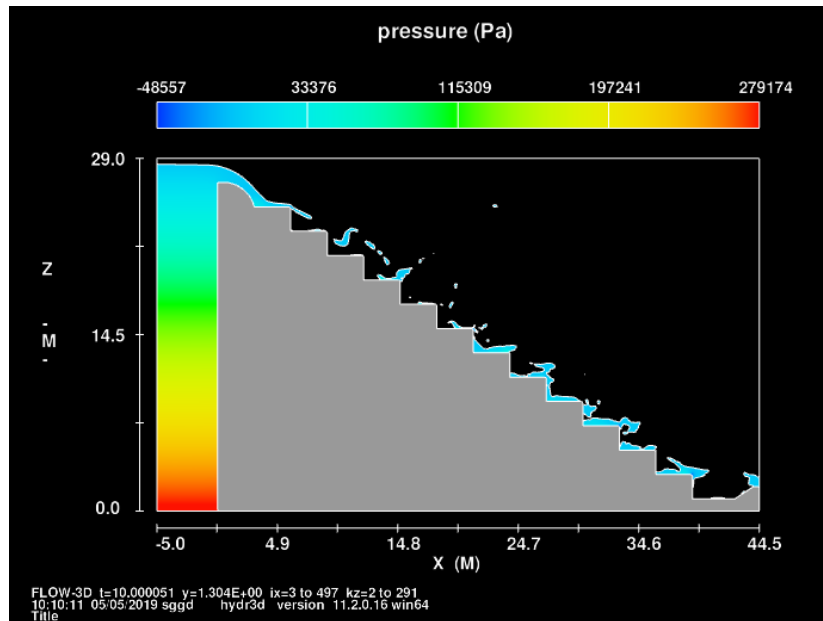


Figura 73. Vista de Perfil en del vertedero escalonado MP-02 con presiones para un caudal de 4.50 m³/s.

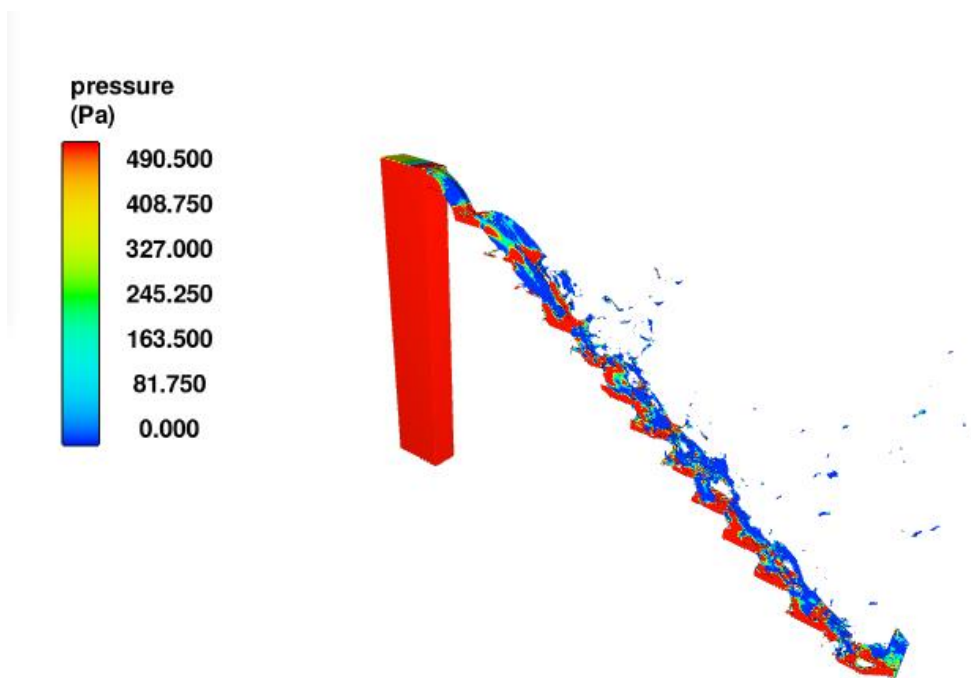


Figura 74. Vista de Perfil en 3D del vertedero escalonado MP-02 con presiones para un caudal de 4.50 m³/s.

4.2.6.2. Velocidad del flujo en el Vertedero Escalonado

Las velocidades que se obtuvieron en las simulaciones son las siguientes:

- Para el prototipo MP-01 A

Tabla 8. Velocidades MP-01

N°	H	V (m/s)	
		t=9s	t=10s
0	26	1.50	1.50
1	24	6.50	3.20
2	22	6.50	6.50
3	20	7.00	4.80
4	18	7.70	8.00
5	16	9.70	9.70
6	14	9.00	9.70
7	12	8.50	9.70
8	10	10.20	7.00
9	8	10.00	7.80
10	6	9.70	7.78
11	4	10.00	10.00
12	2	9.50	10.00
POZA	0	6.50	3.89

FUENTE: Elaboración Propia

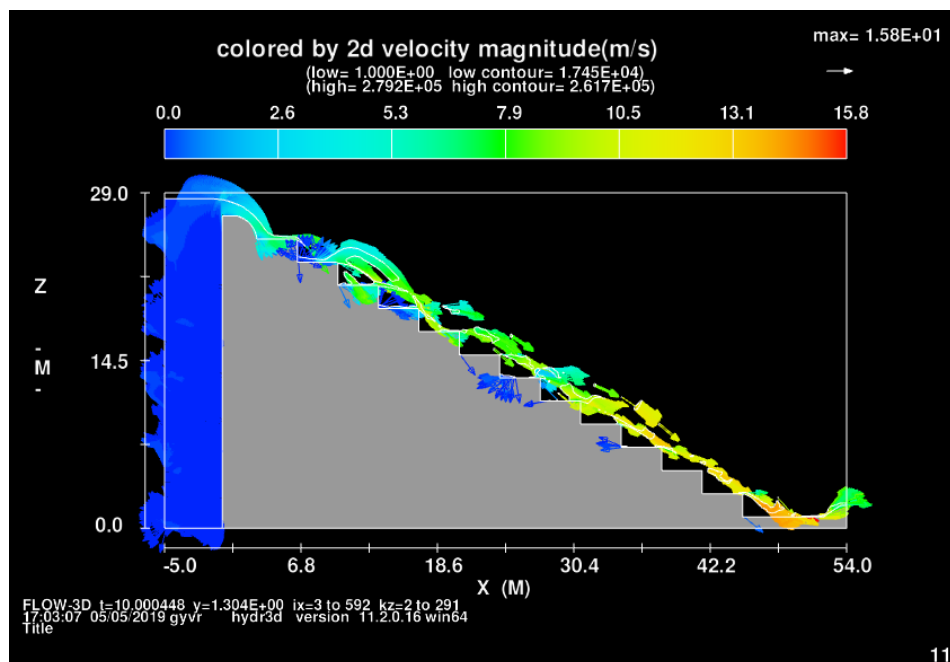


Figura 75. Vista de Perfil del vertedero escalonado MP-01 con velocidades para un caudal de 4.50 m³/s.

Time Frame: 10.00045

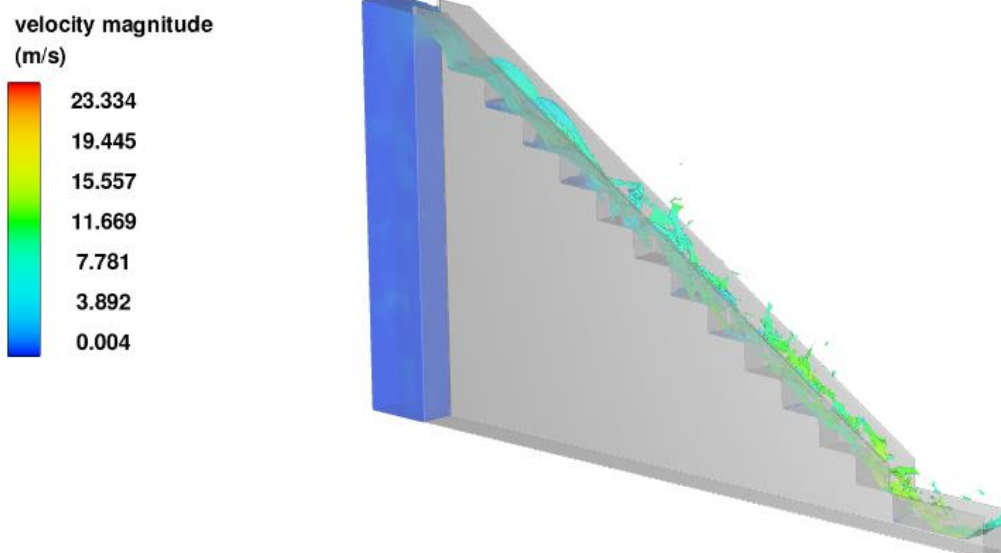


Figura 76. Vista de Perfil en 3D del vertedero escalonado MP-01 con velocidades para un caudal de 4.50 m³/s.

- Para el prototipo MP-02

Tabla 9. Velocidades MP-02

N°	H	V	
		(m/s) t=9s	(m/s) t=10s
0	26	1.50	1.50
1	24	5.50	4.20
2	22	8.00	5.80
3	20	8.40	7.60
4	18	9.60	9.80
5	16	8.60	11.20
6	14	8.80	10.00
7	12	8.20	9.40
8	10	10.40	8.20
9	8	9.60	7.80
10	6	9.80	7.60
11	4	7.50	7.60
12	2	4.30	5.80
POZA	0	3.50	4.40

FUENTE: Elaboración Propia

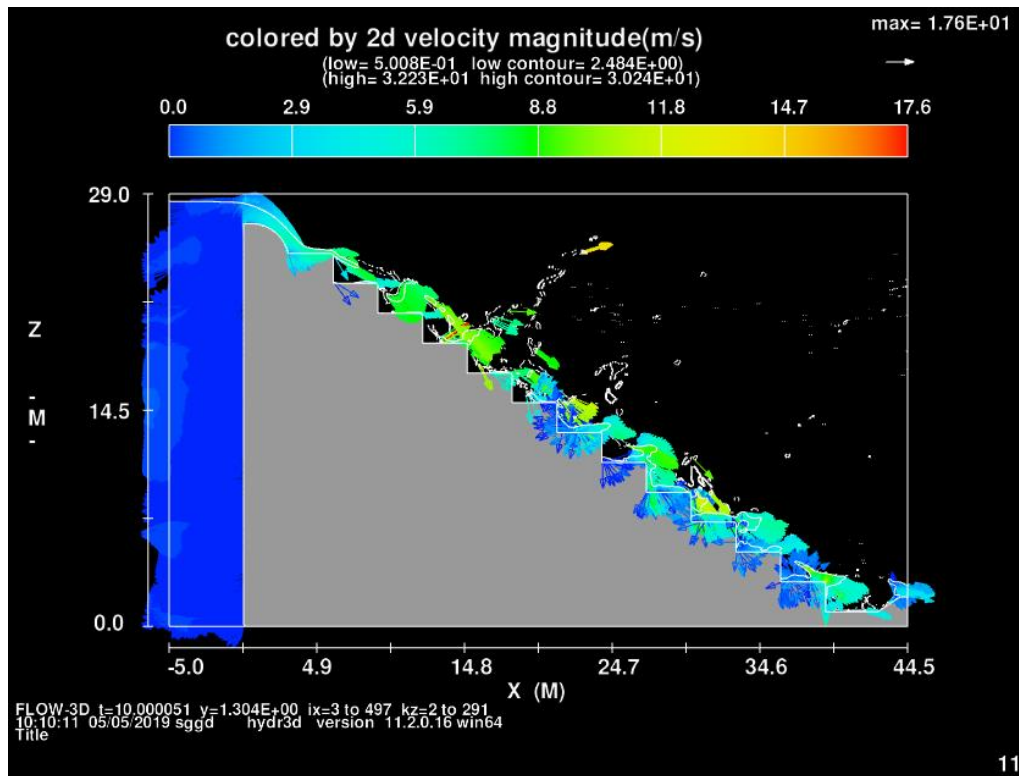


Figura 77. Vista de Perfil del vertedero escalonado MP-02 con velocidades para un caudal 4.50 m3/s

Time Frame: 10.00005

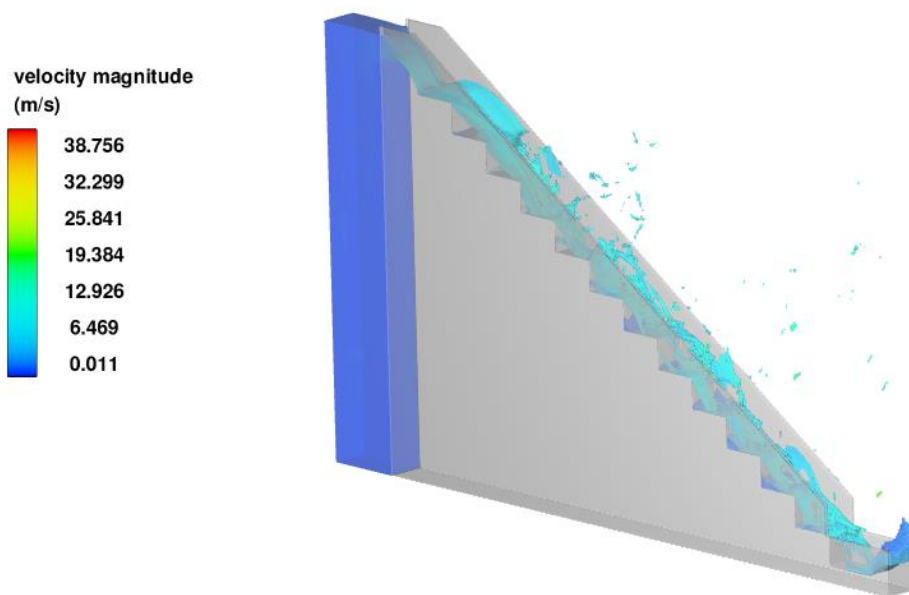


Figura 78. Vista de Perfil en 3D del vertedero escalonado MP-02 con velocidades para un caudal de 4.50 m3/s

4.2.7. Disipación de energía en modelos en software

- Para el prototipo MP-01

Tabla 10. Disipación de Energía en MP-01

y1 (m)	y2 (m)	v1 (m/s)	v2 (m/s)	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)
0.3462	0.7031	6.50	3.20	2.500	1.225	1.275
0.3462	0.4500	6.50	5.00	2.500	1.724	0.775
0.3214	0.4688	7.00	4.80	2.819	1.643	1.176
0.2922	0.2813	7.70	8.00	3.314	3.543	-0.229
0.2320	0.2320	9.70	9.70	5.028	5.028	0.000
0.2500	0.2320	9.00	9.70	4.378	5.028	-0.649
0.2647	0.2320	8.50	9.70	3.947	5.028	-1.080
0.2206	0.3214	10.20	7.00	5.523	2.819	2.704
0.2250	0.2885	10.00	7.80	5.322	3.389	1.932
0.2320	0.2892	9.70	7.78	5.028	3.374	1.653
0.2250	0.2250	10.00	10.00	5.322	5.322	0.000
0.2368	0.2250	9.50	10.00	4.837	5.322	-0.485

FUENTE: Elaboración Propia

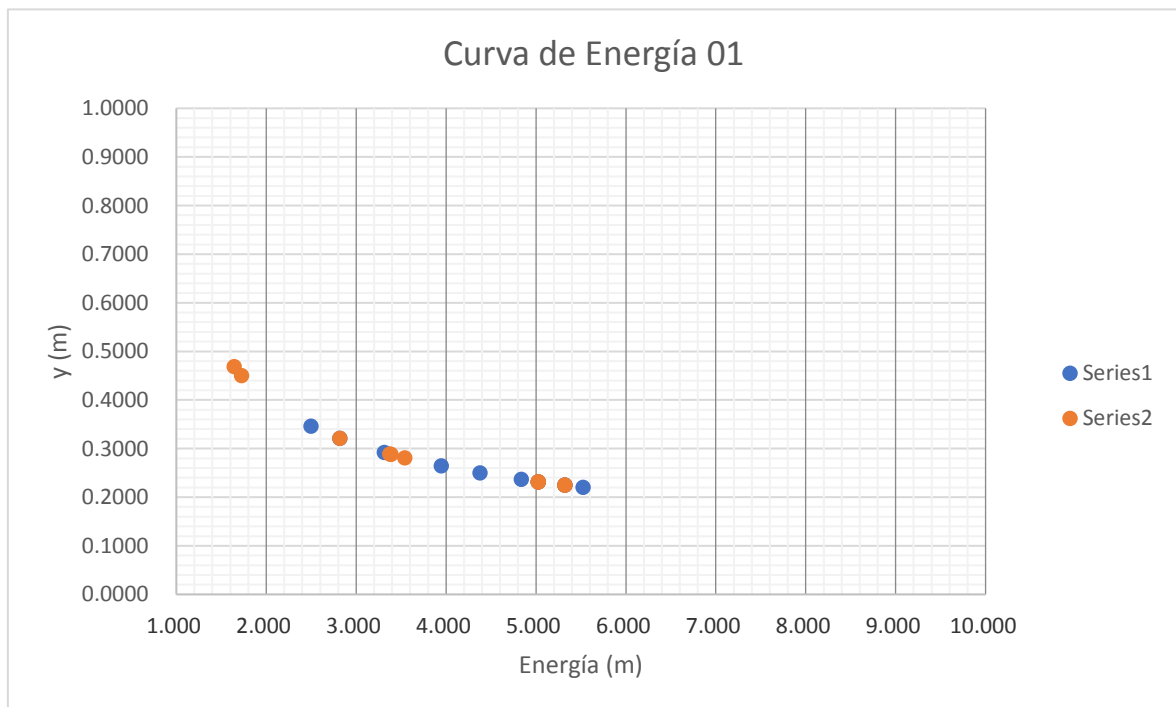


Figura 79. Curva de Energía MP-01
Elaboración Propia

- Para el prototipo MP-02

Tabla 11. Disipación de Energía en MP-02

y1 (m)	y2 (m)	v1 (m/s)	v2 (m/s)	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)
0.4091	0.5357	5.50	4.20	1.951	1.435	0.516
0.2813	0.3879	8.00	5.80	3.543	2.103	1.441
0.2679	0.2961	8.40	7.60	3.864	3.240	0.624
0.2344	0.2296	9.60	9.80	4.932	5.125	-0.193
0.2616	0.2009	8.60	11.20	4.031	6.594	-2.563
0.2557	0.2250	8.80	10.00	4.203	5.322	-1.119
0.2744	0.2394	8.20	9.40	3.702	4.743	-1.041
0.2163	0.2744	10.40	8.20	5.729	3.702	2.028
0.2344	0.2885	9.60	7.80	4.932	3.389	1.542
0.2296	0.2961	9.80	7.60	5.125	3.240	1.885
0.3000	0.2961	7.50	7.60	3.167	3.240	-0.073
0.5233	0.3879	4.30	5.80	1.466	2.103	-0.637

FUENTE: Elaboración Propia

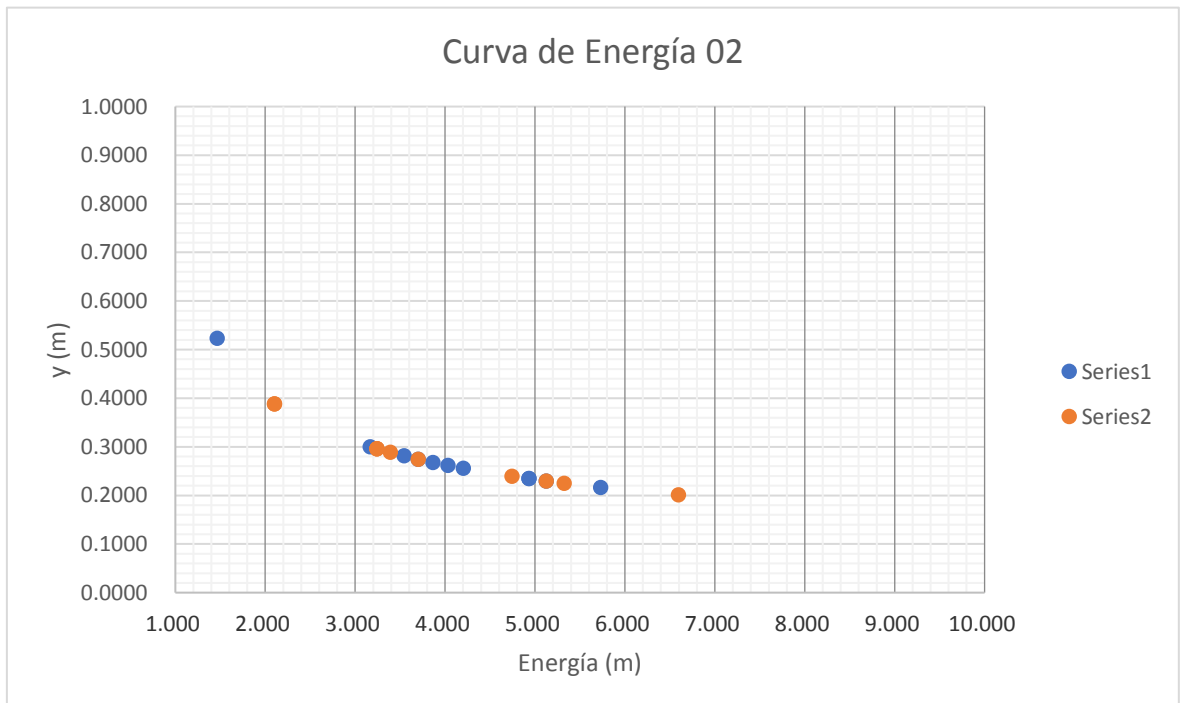
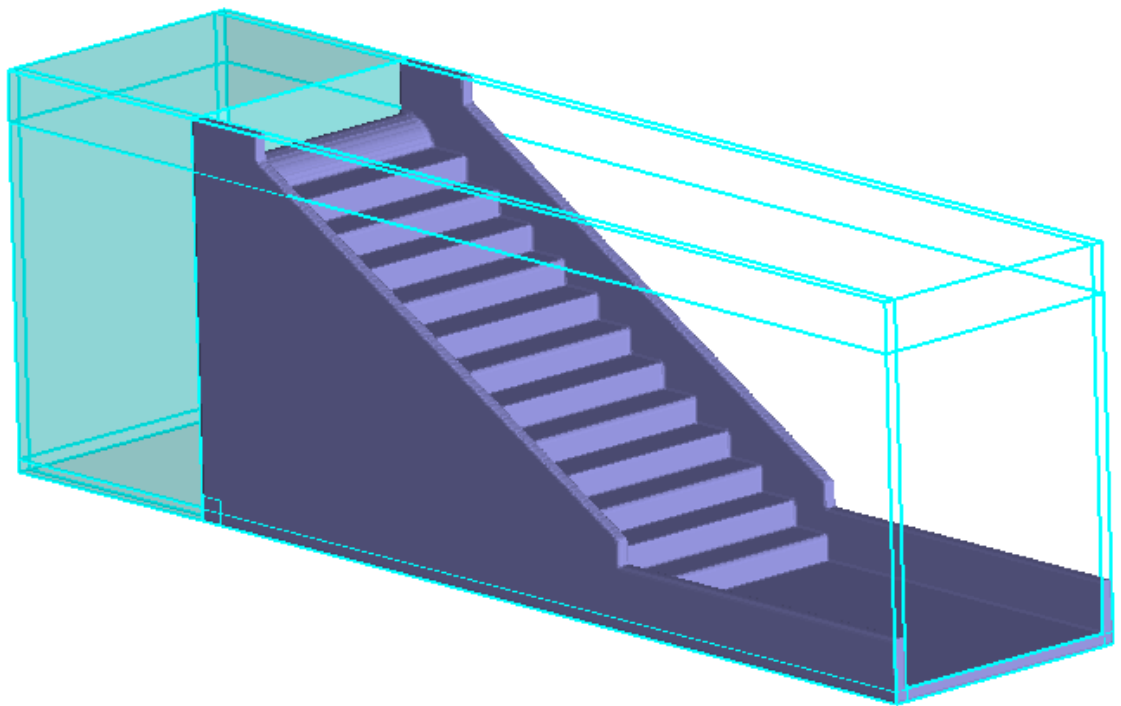
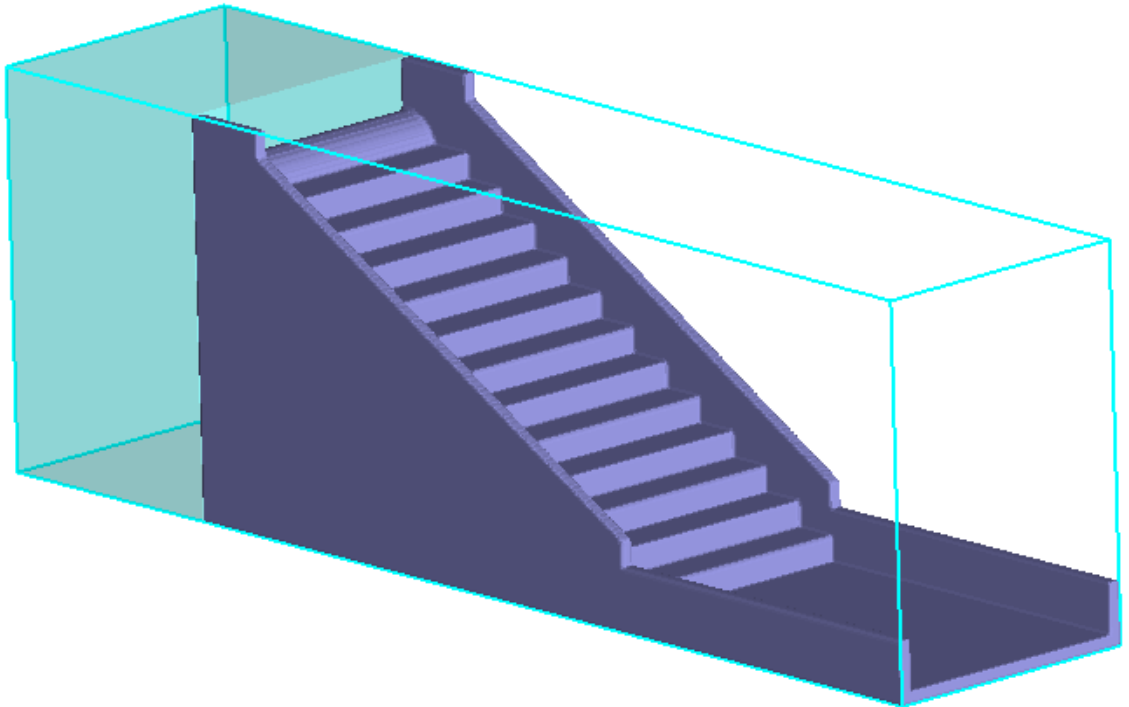
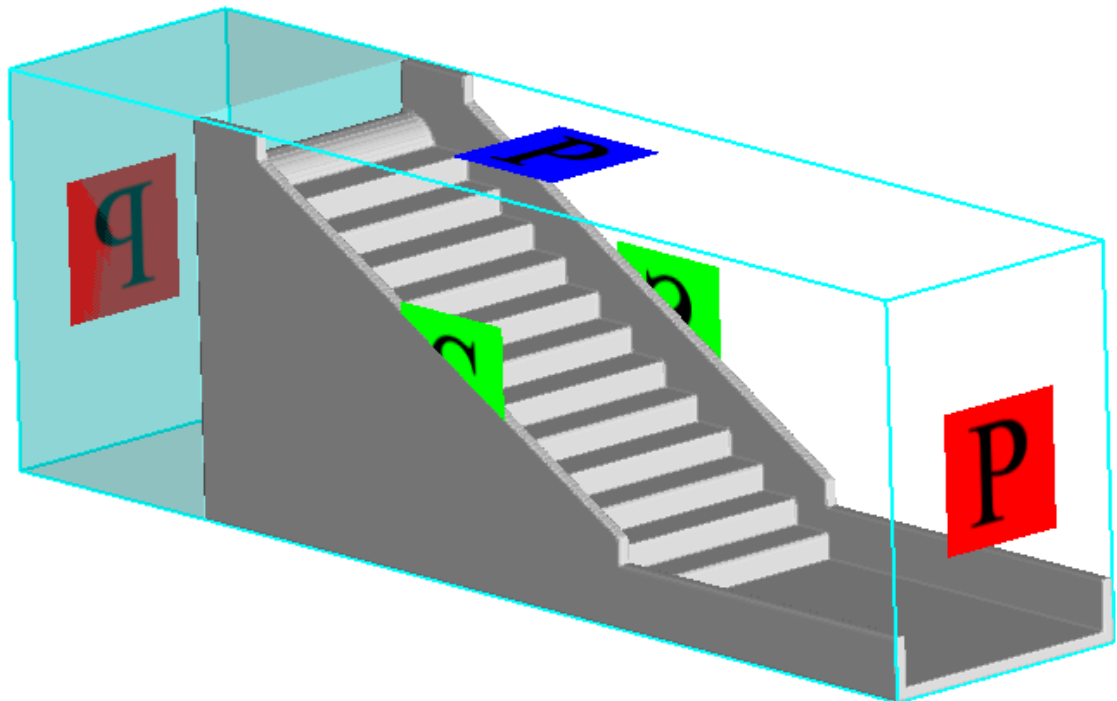
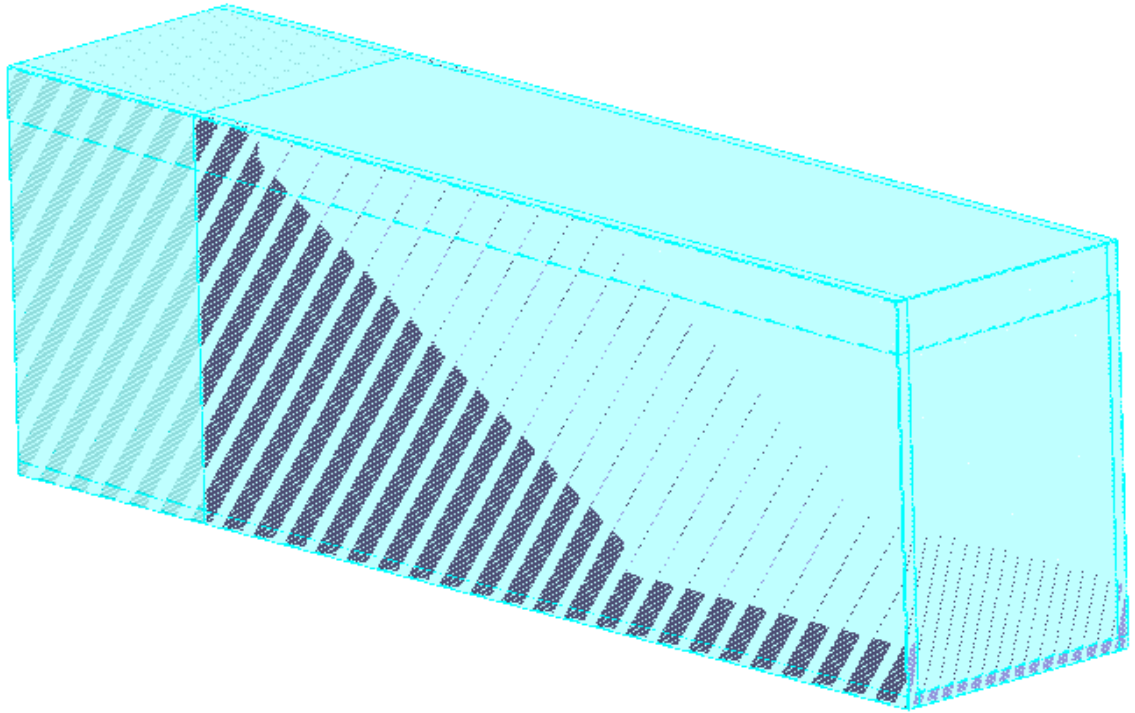


Figura 75. Curva de Energía MP-02

4.2.8. Modelación del vertedero en estudio con diferente escala y ancho.





Las presiones en el vertedero escalonado MP-02 A con caudal $Q= 40.50 \text{ m}^3/\text{s}$ son desde $P_{\text{mín}}= 9474 \text{ Pa}$ (0.9661 mca). Y $P_{\text{máx}}=151565 \text{ Pa}$ (15.4558 mca). La presión en el colchón dissipador es $P= 13.1 \text{ Pa}$ (0.0013 mca).

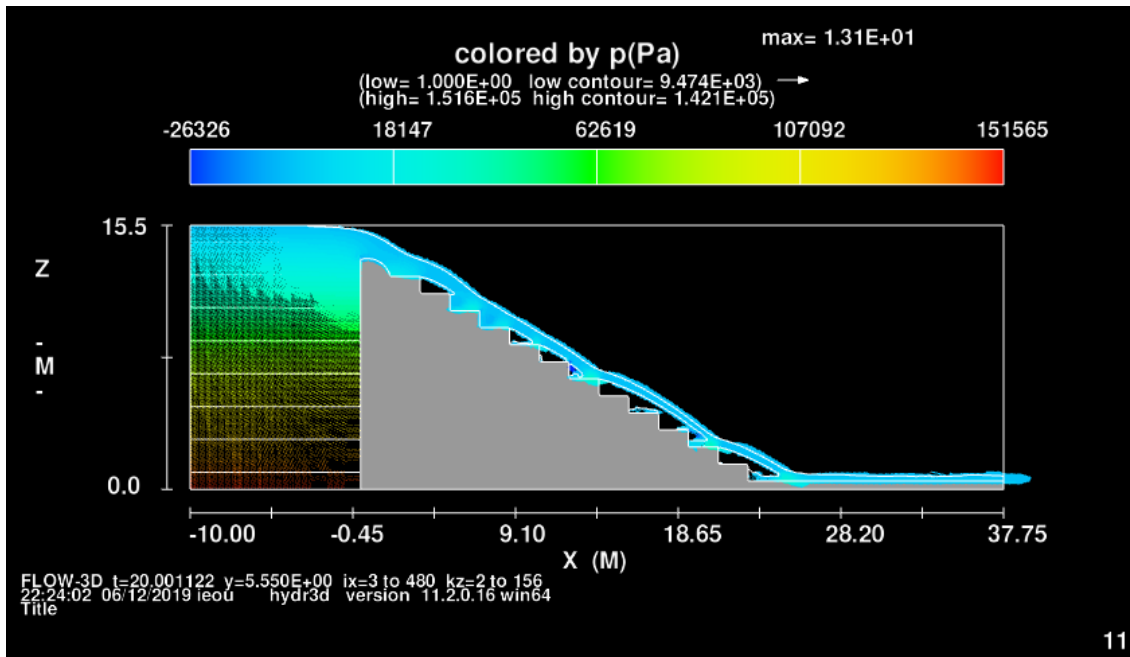


Figura 81. Vista de Perfil del vertedero escalonado Escala Real con presiones para un caudal de 40.50 m³/s.

Time Frame: 20.00112

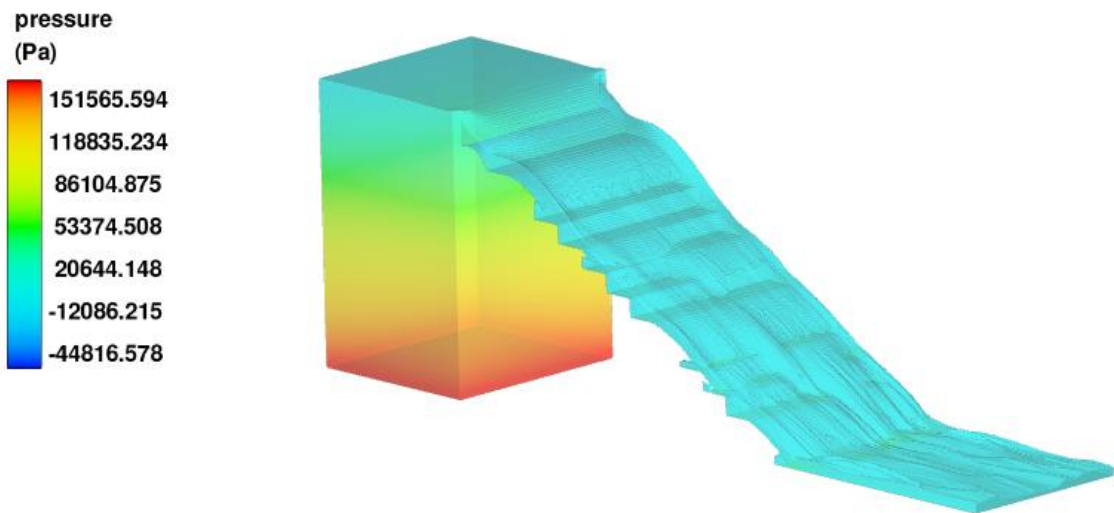


Figura 82. Vista de Perfil en 3D del vertedero escalonado Escala Real con presiones para un caudal de 40.50 m³/s.

Las velocidades que se obtuvieron en las simulaciones son las siguientes:

- Para el Vertedero Escala Real

Tabla 12. Vertedero Escala Real

N°	H	V	
		(m/s) t=9s	(m/s) t=10s
0	13	2.70	2.70
1	12	5.60	5.40
2	11	6.60	6.80
3	10	8.50	7.40
4	9	8.80	8.20
5	8	9.20	9.20
6	7	10.00	8.70
7	6	10.30	9.30
8	5	11.20	9.30
9	4	12.40	9.00
10	3	13.40	10.00
11	2	13.40	10.90
12	1	13.40	10.50
POZA	0	10.70	9.50

FUENTE: Elaboración Propia

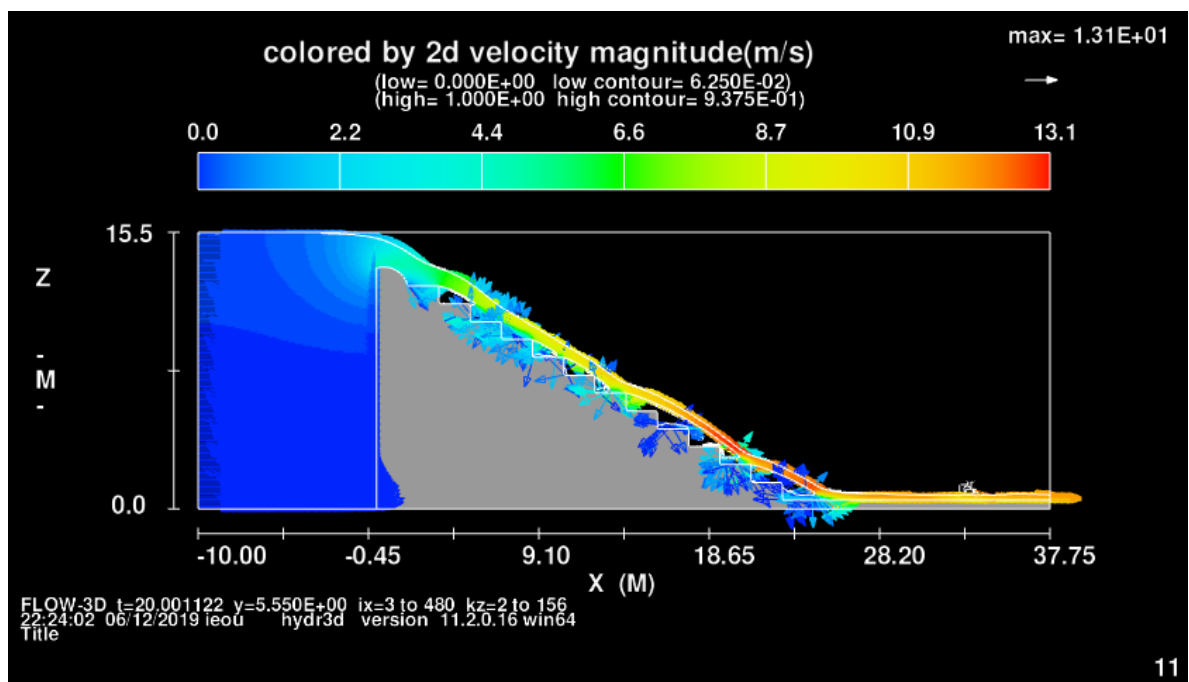


Figura 84. Vista de Perfil del vertedero escalonado Escala Real con velocidades para un caudal de 40.50 m³/s.

Time Frame: 20.00112

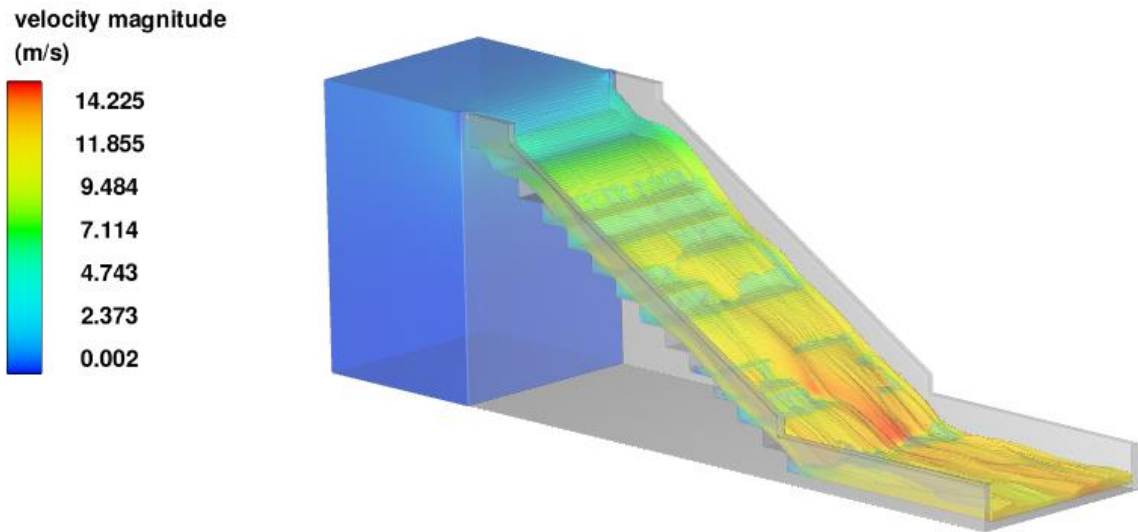


Figura 85. Vista de Perfil en 3D del vertedero escalonado Escalera Real con velocidades para un caudal de 40.50 m³/s.

Tabla 13. Disipación de Energía en Modelo a escala real

y1 (m)	y2 (m)	v1 (m/s)	v2 (m/s)	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)
0.7232	0.7500	5.60	5.40	2.322	2.236	0.085
0.6136	0.6750	6.60	6.00	2.834	2.510	0.324
0.4765	0.5473	8.50	7.40	4.159	3.338	0.821
0.4602	0.4939	8.80	8.20	4.407	3.921	0.486
0.4402	0.4402	9.20	9.20	4.754	4.754	0.000
0.4050	0.4655	10.00	8.70	5.502	4.323	1.179
0.3932	0.4355	10.30	9.30	5.800	4.844	0.957
0.3616	0.4355	11.20	9.30	6.755	4.844	1.911
0.3266	0.4500	12.40	9.00	8.164	4.578	3.585
0.3022	0.4050	13.40	10.00	9.454	5.502	3.952
0.3022	0.3716	13.40	10.90	9.454	6.427	3.027
0.3022	0.3857	13.40	10.50	9.454	6.005	3.449

FUENTE: Elaboración Propia

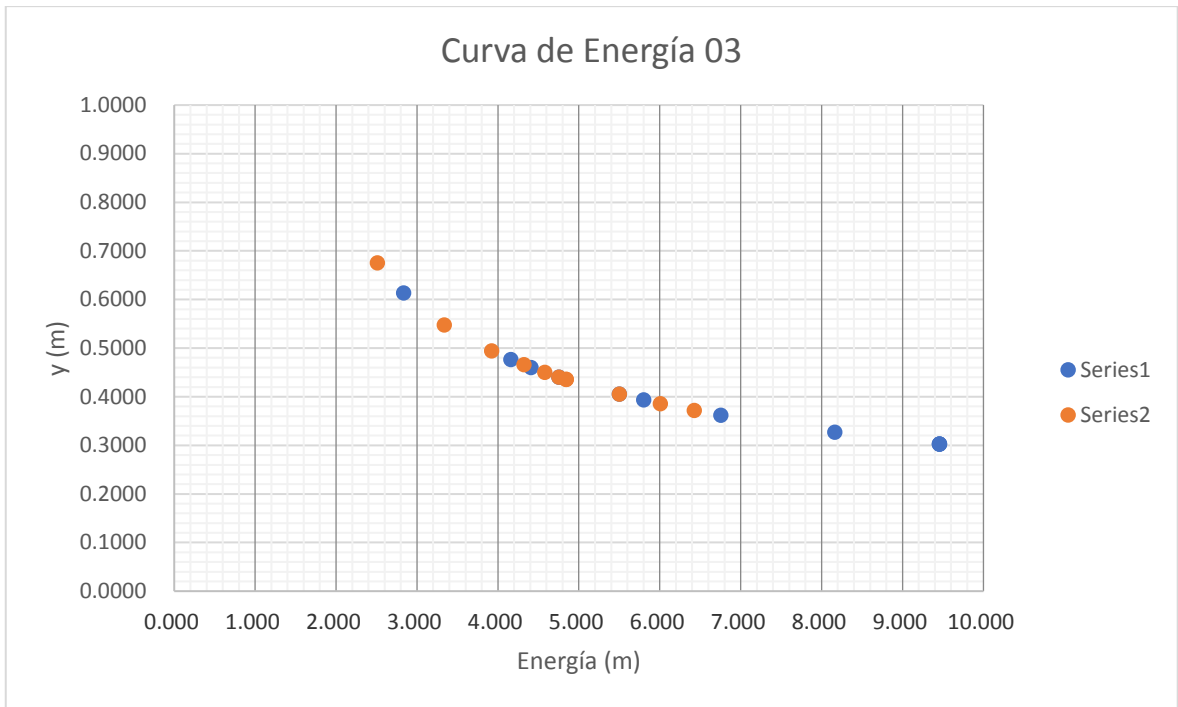


Figura 76. Curva de Energía modelo a escala real

Elaboración Propia

V. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. Tipo de Flujo

En el modelo experimental se trabajó con un caudal de 0.00048 m³/s teniendo un flujo de escalón a escalón, que permitía una mayor disipación de energía. En la simulación realizada en el software Flow 3D se aumentó el caudal, el cual se simuló los prototipos a un modelo de escala real, con un caudal de 4.50 m³/s obteniendo un comportamiento similar, con respecto al flujo y velocidad del agua durante su descenso hacia aguas abajo, consecuentemente tuvo una buena disipación de energía.



Figura 87. Comportamiento del Fluido en Modelo Experimental con un caudal de 0.00048m³/s P-01

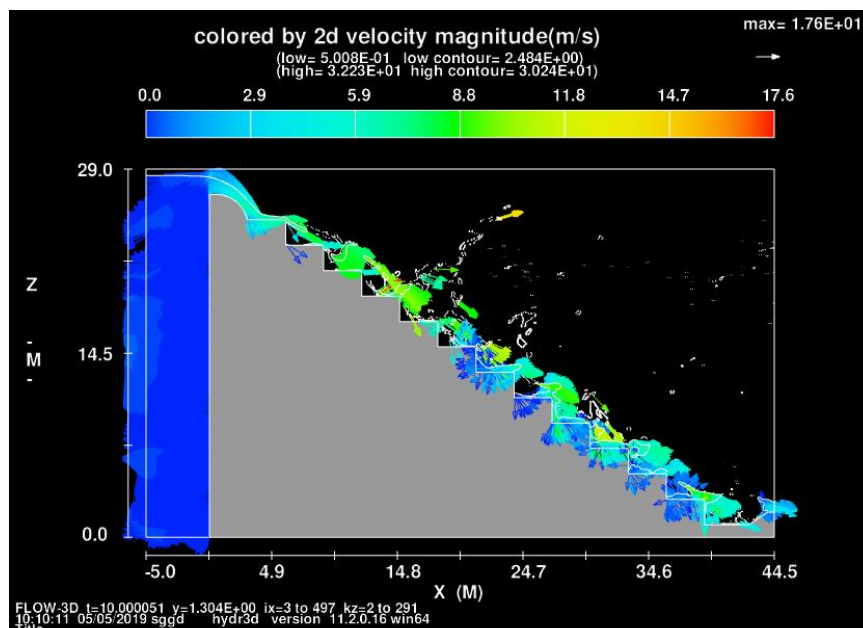


Figura 77. Comportamiento del Fluido en Modelo Experimental con un caudal de 4.5 m³/s MP-02

5.2. Disipación de energía

Teniendo en cuenta que se trabajó con diferentes caudales para la parte experimental y la simulación (debido a que en la simulación se utilizó el modelo a escala real), se pudo encontrar patrones iguales con respecto a la disipación de energía en los primeros 03 escalones, teniendo elevados rangos de disipación en estos.

VI. CONCLUSIONES

- Se diseñaron 02 prototipos de vertederos del tipo escalonado con variación de su longitud de huella, la cual se observa en la figura 33. Prototipo 01, escalón de 0.175x0.10m. y figura 34. Prototipo 02, escalón de 0.15x0.10m, en las páginas 54 y 55.
- Se realizó la modelación numérica de 02 prototipos de vertederos del tipo escalonado en el programa Flow 3D, cuya simulación se observa en la figura 69. MP01-3.50x2.00x2.00 m y la figura 70. MP02-3.00x2.00x2.00m, las cuales se encuentran en la página 88, y cuyos resultados se observan en las páginas 91, 92, 94 y 95.
- Se construyó el equipo experimental desmontable para 02 prototipos de vertederos del tipo escalonado con diferente longitud de huella, estas se observan en la ilustración 1: P1 175x100x950 mm y la ilustración 7: P2 150x100x950 mm en las páginas 113 y 116.
- Se determinó que para caudales menores el tipo de flujo característico es el flujo escalón en escalón (también llamado flujo saltante o en cascada). Esto se observa en las figuras de las páginas 67 al 79.
- Se calcularon las velocidades de los 02 prototipos, de los cuales se obtuvo en el prototipo 01 una $V_i=0.386$ m/s y una $V_{final}=0.358$ m/s; y en el prototipo 02, $V_i=0.456$ m/s y una $V_{final}=0.557$ m/s.
- Del aumento del caudal se obtiene un incremento de velocidad que define el tipo de flujo en la estructura.
- Se observó, registró y calculó las pérdidas de energía del fluido en el prototipo. En el prototipo 01 se calculó una pérdida de energía final de $\Delta E= -0.003$ m y en el prototipo 02, $\Delta E= -0.021$. Esto se observa en las tablas 6 y 7 de las páginas 80 y 81.
- Comparando los resultados de la modelación física experimental en el prototipo 01 (17.5x10) se obtuvo un número de Froude <1 en los pasos 3 y 4 con 1.87 y 1.39 respectivamente y números de Froude <1 en los pasos 10 y 11 con 0.61 y 0.53 respectivamente, esto quiere decir que el régimen se torna subcrítico en los últimos pasos. En la modelación numérica en todos los casos los números de Froude fueron > 1 , esto quiere decir que se mantenía un flujo supercrítico hasta los niveles más bajos de los escalones.

- Se concluye que la utilización de vertederos de tipo escalonado influye significativamente en la disipación de energía si se diseña adecuadamente las dimensiones de sus huellas y contrahuellas partiendo de una avenida extraordinaria (Q_{max}).
- En los modelos a escala real el software Flow 3D tiene buenos resultados, la simulación nos muestra el flujo del líquido y la velocidad del mismo en su recorrido hacia aguas abajo, comparando con el trabajo experimental tiene una similitud aceptable.
- Se puede obtener mejores resultados en la disipación de energía si se disminuye la altura de la contra huella, disminuyendo así el ángulo del vertedero escalonado.

VII. RECOMENDACIONES

- Se puede seguir con la investigación con otras variantes en las dimensiones y materiales de los prototipos.
- Se recomienda tener una mayor longitud de huella y menor altura de contra huella de las gradas del vertedero para tener un mejor comportamiento con respecto a la disipación de energía.
- Trabajar con equipo especializado para la medición con una mayor precisión en la toma de datos como por ejemplo las velocidades, tirantes de agua, y caudales.
- Se recomienda usar bomba de agua de mayor potencia para la circulación de agua en los fluidos, así como un tanque de mayor capacidad.
- Se recomienda no usar caudales pequeños en la modelación numérica, para poder obtener mejores resultados, los cuales se asemeje con mayor precisión a la realidad, esto debido a que la simulación en el software esta no se asemeja mucho a la realidad.
- Se recomienda seguir con la investigación y experimentación del tema, agregando algunas variantes, como incluir en algunas gradas bloques de forma trapezoidal que ayuden a mejorar la disipación de energía durante su caída hacia aguas abajo.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Flores, W. (2015). Comportamiento del Flujo en Vertedores Escalonados con Descarga Convergente (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Morelos, México.
- Aguilar, A. y Laurel, J. (2011). Simulación Física y Matemática del Flujo en Vertedores Escalonados. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado de <http://repositorio.imta.mx/>
- Latessa, P. y Sabarots, M. (2014). Vertederos Escalonados, Abordaje Teórico, Experimental y Numérico. Argentina: Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Recuperado de <http://www.ina.gov.ar/>
- Moffat, A., Nalluri, C. y Novak, P. (2011). Estructuras Hidráulicas. Bogota, Colombia. McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Alcocer, V. y Arreguín, F. (2011). Diseño Hidráulico de Vertederos. Morelos, México. IMTA.
- Alegret, E. y Pardo, R. (2005). Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas. La Habana, Cuba.
- Rosales, J. (2013). Flujo Aire-Agua en Vertedores (Tesis de grado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Arreguín, F. (2000). Obras de Excedencia. Morelos, México. IMTA.
- Álvarez, I. (2013). "Estudio sobre el Comportamiento Hidrodinámico de un Tanque Amortiguador (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Amador, A. Dolz, J. y Sanchez, M. (2006). Diseño Hidráulico de Aliviaderos Escalonados en Presas de HCR. Ingeniería del Agua, volumen 13, 290.
- Táboas, A. (2006). Comportamiento Hidráulico de los Aliviaderos Escalonados en Presas de Hormigón Compactado. Barcelona, España. Dep. de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental UPC.
- Khatsuria, R. (2005). Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. Marcel Dekker, Estados Unidos.
- Chanson, H. (2001). Hydraulic Design of Stepped Spillways and Dowsntream Energy Dissipators, en Dam Engineering, Vol. 11, No 4. Editorial Balkema.

- González, A., Chanson, H. (2007). Diseño hidráulico de vertederos escalonados con pendientes moderadas: metodología basada en un estudio experimental, México.
- Latessa, P. y Gerbec, S. (2014). Vertederos escalonados, abordaje teórico, experimental y numérico. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería.

ANEXOS

VERTDERO ESCALONADO MP-01 (175x100x950 mm)

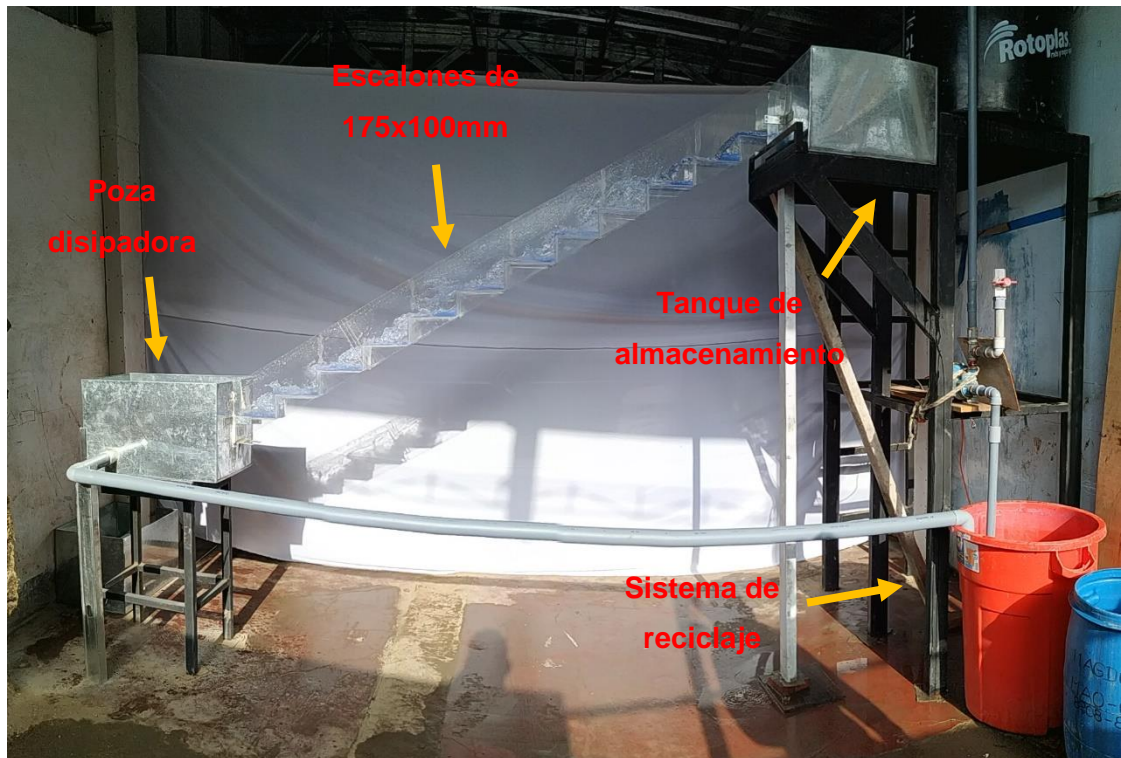


Ilustración 1. Prototipo 01 de 175x100x950mm

Fuente: Elaboración Propia

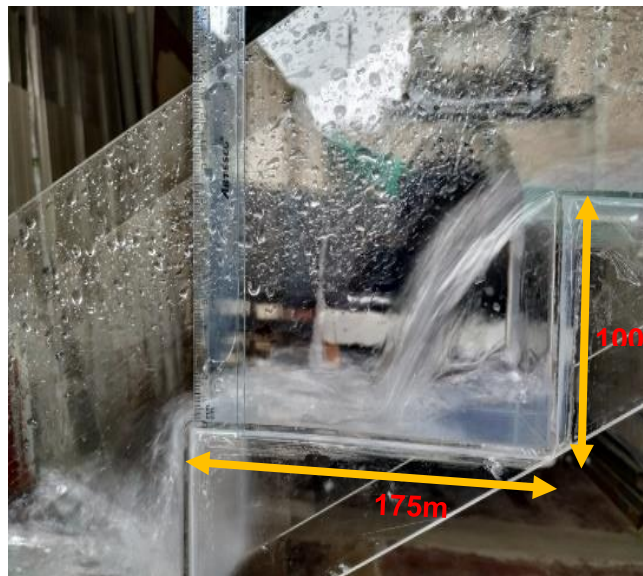


Ilustración 2. Escalón de 175x100x950mm

Fuente: Elaboración Propia

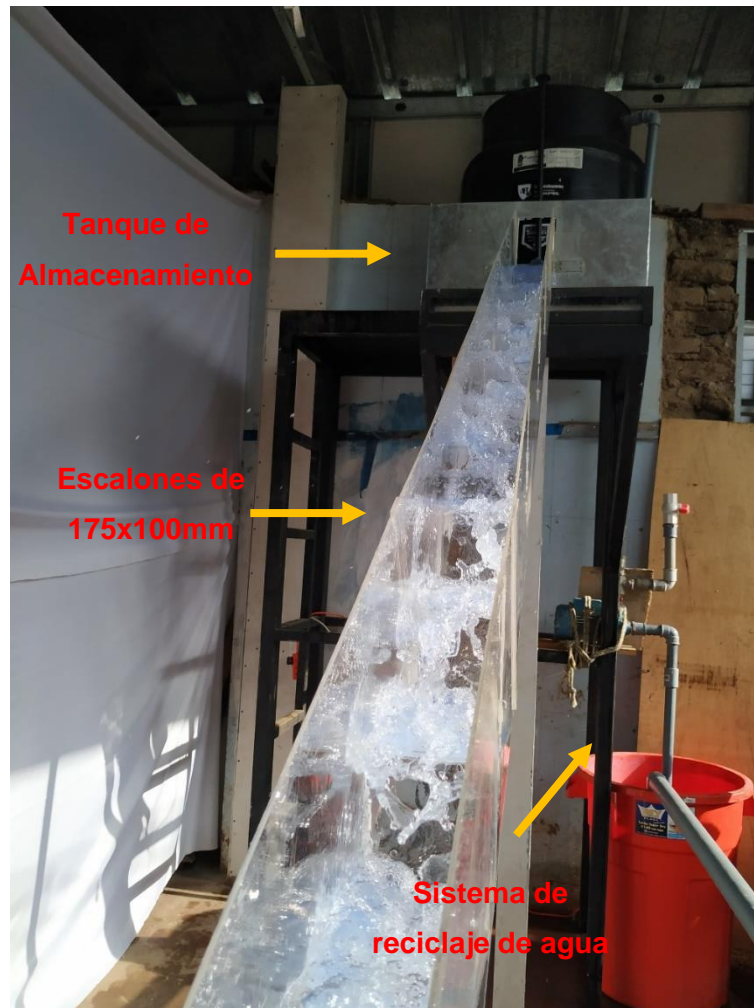


Ilustración 3. Vista de escalones y tanque de almacenamiento
Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 4. Flujo escalón a escalón.
Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 5. Flujo escalón a escalón en prototipo 01.

Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 6. Flujo de agua en prototipo 01.

Fuente: Elaboración Propia

VERTEDERO ESCALONADO MP-02 (150xx100x950 mm)

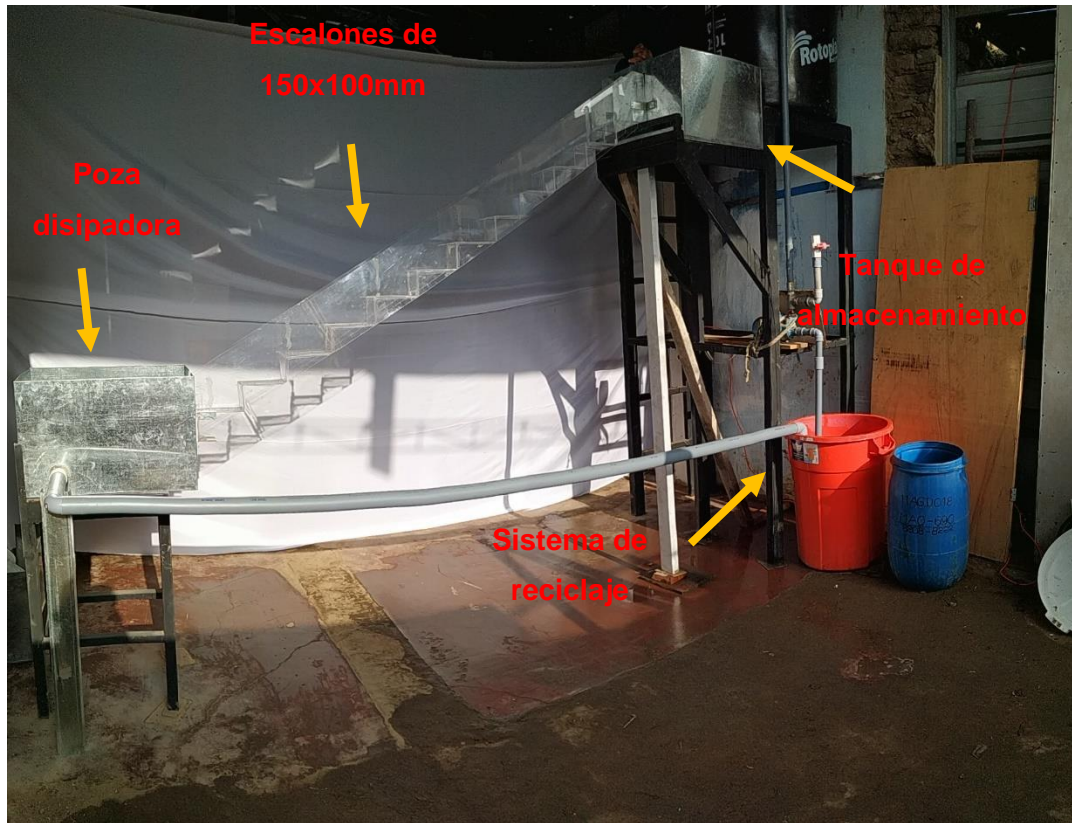


Ilustración 7. Prototipo 02 de 150x100x950mm
Fuente: Elaboración Propia

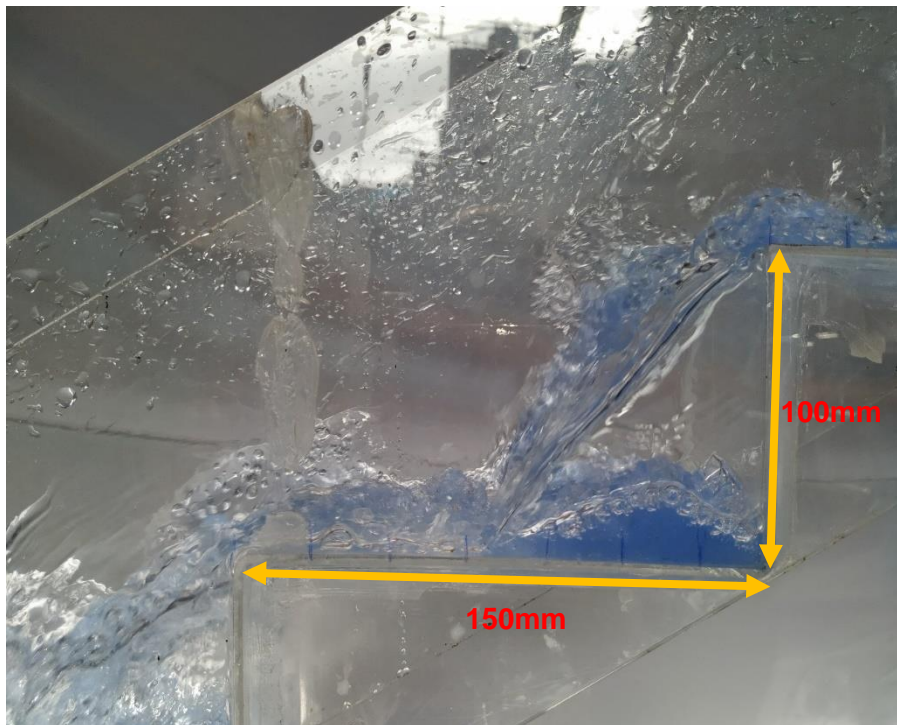


Ilustración 8. Escalón de 150x100x950mm.

Fuente: Elaboración Propia

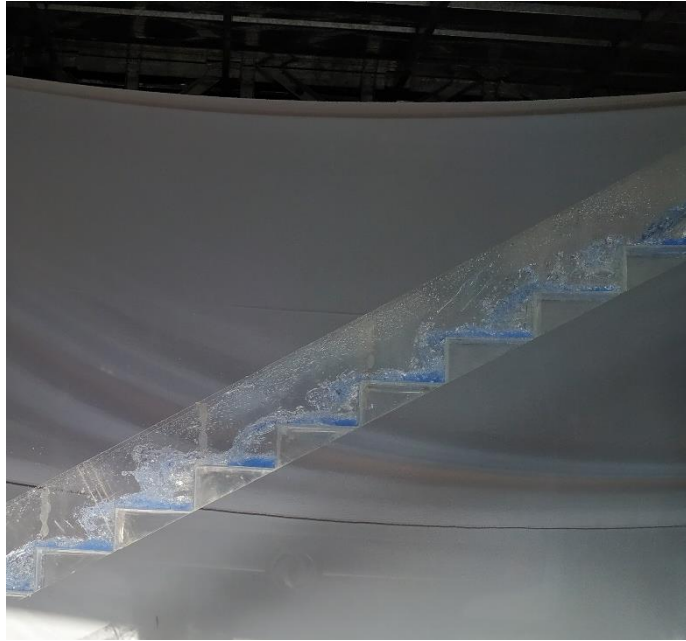


Ilustración 9. Flujo escalón a escalón en prototipo 02.
Fuente: Elaboración Propia

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE PROTOTIPOS

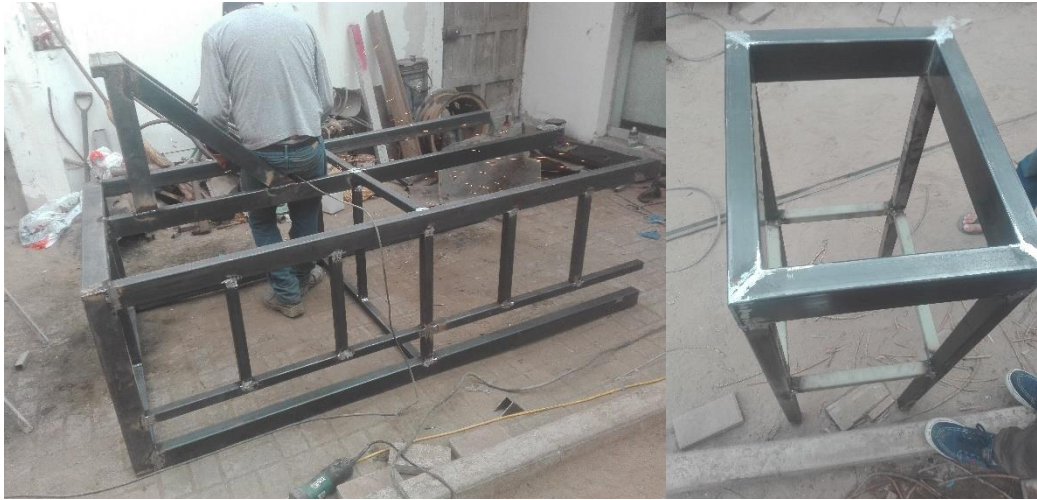


Ilustración 10. Fabricación del soporte del prototipo.

Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 11. Recepción de los escalones de acrílico de 175x100mm y 150x100mm

Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 12. Montaje del prototipo.
Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 13. Montaje de poza disipadora y tanque de almacenamiento.
Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 14. Montaje del sistema de reciclaje de agua.
Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 15. Final de los trabajos de montaje del prototipo.
Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 16. Poza disipadora y tanque de almacenamiento terminados.
Fuente: Elaboración Propia

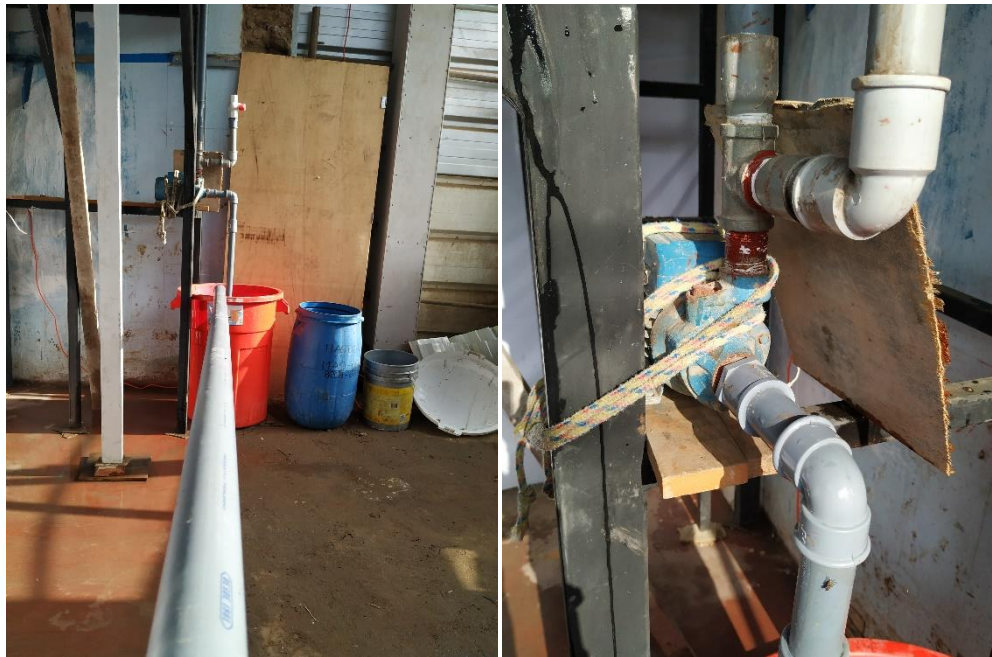


Ilustración 17. Sistema de reciclaje y bomba instalada.
Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 18. Los bachilleres Elar Vásquez y Enrique Quispe con los prototipos ensamblados.

Fuente: Elaboración Propia

TOMA DE DATOS



Ilustración 19. Estimación del caudal del prototipo.

Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 20. Toma de velocidades en el prototipo.

Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 21. Medición de tirantes en el prototipo.

Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 22. Evaluación del flujo de agua en el prototipo.

Fuente: Elaboración Propia