

**ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**MODELO HIDRÁULICO FÍSICO DE DISIPADORES DE  
ENERGÍA, COMO AYUDA DE APRENDIZAJE DE LA  
MATERIA DE HIDRÁULICA**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO CIVIL**

ELABORADO POR:

**FREDDY GUILLERMO ORTIZ ORTIZ**

SANGOLQUI, Agosto de 2010

## RESUMEN

El país por poseer una gran cantidad de recursos hídricos tiene potencial de construcción de obras hidráulicas, por lo cual los estudiantes de ingeniería civil deben reforzar los conocimientos que se adquieren en las aulas, observando en modelos a escala los fenómenos hidráulicos que ocurren.

Un anhelo de la facultad de ingeniería civil ha sido la de preparar a sus alumnos de una manera teórico-práctica, de ahí la importancia de la implantación del laboratorio de Hidráulica.

Este trabajo estudiará los tipos de disipadores de energía hidráulica, su diseño, construcción y operación. Tendrá un mayor énfasis el estudio del resalto hidráulico como disipador de energía ya que es la base de los demás tipos de disipadores.

El proyecto servirá además como guía para futuras construcciones de modelos, enriqueciendo los conocimientos de los estudiantes, quienes serán los mayores beneficiados.

## SUMMARY

This country, possessing a big quantity of hydric resources has a great potential of construction of hydraulic works. Therefore, civil engineering students must reinforce their knowledge, acquired at university, observing the occurring hydraulic phenomena in scale models, preparing the students in a theoretical - practical manner has been always wished by the civil engineering faculty, which explains the importance of the implantation of the Hydraulic Laboratory.

This work will study the types of dispersers of hydraulic energy, their design, construction and operation. The greatest emphasis will be given to the study of the hydraulic rebound as a disperser of energy, since it is the basis of the other types of dispersers.

Besides that, the project will serve as a guidance in the construction of future models, enriching the knowledge of the students, who will be the most benefited.

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. FREDDY GUILLERMO ORTIZ ORTIZ como requerimiento parcial a la obtención del título de INGENIERO CIVIL.

AGOSTO, 23 de 2010

---

Fecha

---

Ing. Miguel Araque

---

Ing. Eugenio Villacís

REVISADO POR

---

Ing. Jorge Zúñiga

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todos los estudiantes provenientes de otras ciudades, por el esfuerzo que realizan al dejar a su familia y amigos, empezando una nueva vida lejos de su lugar de origen.

*Freddy*

## AGRADECIMIENTO

A mis padres por todo el apoyo brindado en mi vida.

Al ingeniero Miguel Araque por ser el mentalizador de este proyecto y por toda la ayuda brindada.

Al ingeniero Eugenio Villacís por su colaboración.

A todas las personas que ayudaron de una u otra manera a lo largo de mi carrera estudiantil.

*Freddy*

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	II
SUMMARY .....	III
CERTIFICACIÓN .....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
CAPÍTULO I .....	1
1. MODELAJE HIDRÁULICO.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Clases de modelos.....	2
1.2.1. Modelos Matemáticos.....	2
1.2.2. Modelos Físicos Reducidos.....	3
1.3. Similitud .....	5
1.3.1. Similitud Geométrica .....	6
1.3.2. Similitud Cinética .....	7
1.3.3. Similitud Dinámica .....	8
1.3.3.1. Número de Froude .....	12
1.3.3.2. Número de Reynolds.....	12
1.3.4. Leyes de Similitud Dinámica.....	12
1.3.4.1. Condición de Froude .....	13

1.3.4.2. Condición de Reynolds.....	15
1.4. Escala .....	19
1.4.1. Consideraciones para seleccionar la Escala .....	20
1.4.2. Efectos de Escala.....	21
CAPÍTULO II .....	23
2. FUNDAMENTO TEÓRICO PRESAS .....	23
2.1. Introducción.....	23
2.2. Cresta .....	24
2.3. Rápida.....	25
2.4. Disipadores de Energía.....	27
2.4.1. Análisis del Resalto Hidráulico .....	29
2.4.1.1. Tipos de Resalto hidráulico .....	30
2.4.1.2. Longitud del resalto hidráulico .....	32
2.4.2. Tipos de Disipadores de Energía .....	33
2.4.2.1. El Resalto Hidráulico como disipador de energía.....	33
2.4.2.1.1. Caso 1 .....	35
2.4.2.1.2. Caso 2.....	36
2.4.2.1.3. Caso 3.....	37
2.4.2.2. Disipador Bureau of Reclamation III .....	38
2.4.2.3. Disipador de Tanque .....	39
2.4.2.4. Salto Esquí.....	40
2.4.2.5. Salto Esquí Sumergido.....	42

2.4.2.6. Salto Esquí Estriado .....	42
CAPÍTULO III .....	44
3. DIMENSIONADO .....	44
3.1. Introducción.....	44
3.2. Vertederos .....	44
3.2.1. Cálculo de la carga del proyecto. ....	44
3.2.1.1. Vertedero de demasías simple.....	45
3.2.1.2. Vertedero de demasías con Salto Esquí .....	48
3.3. Canales.....	50
3.4. Estructuras metálicas.....	51
3.4.1. Mesa Soporte .....	51
3.4.2. Perfiles Metálicos .....	52
3.5. Tubería.....	52
3.6. Tanque.....	53
3.7. Embudo.....	54
3.8. Placa perforada.....	54
CAPÍTULO IV .....	56
4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO.....	56
4.1. Introducción.....	56
4.2. Estructuras Metálicas.....	56
4.2.1. Mesa Soporte .....	56

	X
4.2.2. Apoyos Laterales.....	57
4.3. Tableros.....	58
4.4. Partes de Acrílico.....	59
4.5. Sistema de tuberías y acoples.....	60
4.6. Sistema Eléctrico.....	60
4.7. Tanque de almacenamiento.....	61
4.8. Mangueras.....	62
4.9. Sistema de Recirculación.....	62
4.10. Desagües.....	63
4.10.1. Desagüe en el embalse.....	63
4.10.2. Desagüe en el tanque de almacenamiento.....	64
4.10.3. Placa agujereada.....	65
4.11. Análisis de Costos.....	68
CAPÍTULO V.....	69
5. CALIBRACION DEL MODELO Y REALIZACIÓN DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO.....	69
5.1. Comprobación de las Fórmulas Teóricas en el Modelo.....	69
5.1.1. Altura sobre el vertedero.....	69
5.1.2. Velocidad de Salida ( $V_o$ ).....	69
5.1.3. Velocidad de Llegada ( $V_1$ ).....	71
5.2. Curva de Descarga.....	72

5.3. Ensayos Realizados.....	74
5.3.1. Práctica # 01: Disipador por resalto hidráulico .....	74
5.3.1.1. Objetivo .....	74
5.3.1.2. Marco teórico.....	74
5.3.1.3. Equipo .....	75
5.3.1.4. Procedimiento .....	75
5.3.1.5. Resultados .....	75
5.3.2. Práctica # 02: Disipador Esquí .....	86
5.3.2.1. Objetivo .....	86
5.3.2.2. Marco teórico.....	86
5.3.2.3. Equipo .....	86
5.3.2.4. Procedimiento .....	87
5.3.2.5. Resultados .....	87
5.3.3. Práctica # 03: Disipador esquí sumergido. ....	91
5.3.3.1. Objetivo .....	91
5.3.3.2. Marco teórico.....	91
5.3.3.3. Equipo .....	91
5.3.3.4. Procedimiento .....	92
5.3.3.5. Resultados .....	92
6. CONCLUSIONES.....	96
7. RECOMENDACIONES .....	97
8. BIBLIOGRAFÍA .....	98
9. ANEXOS .....	100

A. Formatos para realizar las Prácticas ..... 100

**LISTADO DE TABLAS**

<b>Tabla 1.1</b> Valores de las escalas de longitudes para las condiciones de Froude y de Reynolds.....	18
<b>Tabla 3.1</b> Valores de las coordenadas (en cm) del perfil Creager. ....	48
<b>Tabla 4.1</b> Valores de costos en la construcción del modelo. ....	68
<b>Tabla 5.1</b> Valores de caudal y velocidad de salida. ....	70
<b>Tabla 5.2</b> Valores de caudal y velocidad de salida. ....	71
<b>Tabla 5.3</b> Valores de Caudal y altura sobre la cresta. ....	72
<b>Tabla 5.4</b> Valores de las velocidades para un obstáculo de 0.015 m de altura. ...	77
<b>Tabla 5.5</b> Valores de las velocidades para un obstáculo de 0.02 cm de altura.....	79
<b>Tabla 5.6</b> Valores de las velocidades para un obstáculo de 0.025 m de altura. ...	81
<b>Tabla 5.7</b> Valores de velocidades para un obstáculo de 0.03 m de altura. ....	83
<b>Tabla 5.8</b> Valores de velocidades para el dissipador tipo esquí. ....	89
<b>Tabla 5.9</b> Valores de velocidades para el dissipador tipo esquí sumergido.....	94

## LISTADO DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 3.1</b> Perfil de Creager para el proyecto. ....	49
<b>Gráfico 5.1</b> Velocidad de salida según el caudal. ....	70
<b>Gráfico 5.2</b> Velocidad de llegada según el caudal. ....	71
<b>Gráfico 5.3.</b> Curva de descarga para el modelo. ....	73
<b>Gráfico 5.4</b> Velocidades para un obstáculo de 0.015 m de altura. ....	77
<b>Gráfico 5.5</b> Velocidades $V_0$ , $V_2$ , $V_3$ , (obstáculo de 0.015 m). ....	77
<b>Gráfico 5.6</b> Velocidades para un obstáculo de 0.02 m de altura. ....	79
<b>Gráfico 5.7</b> Velocidades $V_0$ , $V_2$ , $V_3$ , (obstáculo de 0.02 m). ....	79
<b>Gráfico 5.8</b> Velocidades para un obstáculo de 0.025 m de altura. ....	81
<b>Gráfico 5.9</b> Velocidades $V_0$ , $V_2$ , $V_3$ , (obstáculo de 0.025 m). ....	81
<b>Gráfico 5.10</b> Velocidades para un obstáculo de 0.03 m de altura. ....	83
<b>Gráfico 5.11</b> Velocidades $V_0$ , $V_2$ , $V_3$ , (obstáculo de 0.03 m). ....	83
<b>Gráfico 5.12</b> Velocidades para el dissipador esquí. ....	89
<b>Gráfico 5.13</b> Velocidades $V_0$ , $V_2$ para el dissipador esquí. ....	89
<b>Gráfico 5.14</b> Velocidades para el dissipador tipo esquí sumergido. ....	94
<b>Gráfico 5.15</b> Velocidades $V_0$ , $V_2$ , $V_3$ , para el dissipador esquí sumergido. ....	94

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Similitud Geométrica. ....	6
<b>Figura 1.2</b> Similitud Cinética. ....	8
<b>Figura 1.3</b> Similitud Dinámica. ....	9
<b>Figura 1.4</b> Escala y Puntos Homólogos. ....	20
<b>Figura 2.1</b> Partes del Vertedero de demasías. ....	24
<b>Figura 2.2</b> Perfil de la lámina de agua que sale de un vertedor de pared delgada. .....	25
<b>Figura 2.3</b> Comportamiento del agua en la rápida. ....	26
<b>Figura 2.4</b> Esquema de una rápida lisa. ....	26
<b>Figura 2.5</b> Esquema de una rápida escalonada. ....	27
<b>Figura 2.6</b> Etapas de la disipación de energía. ....	28
<b>Figura 2.7</b> Transición de Flujo. ....	29
<b>Figura 2.8</b> $Fr_1 = 1$ No se forma resalto ....	30
<b>Figura 2.9</b> $Fr_1=1-1.7$ Resalto ondulante. ....	30
<b>Figura 2.10</b> $Fr_1 = 1.7-2.5$ Resalto débil. ....	31
<b>Figura 2.11</b> $Fr_1 = 2.5 - 4.5$ Resalto oscilante. ....	31
<b>Figura 2.12</b> $Fr_1 = 4.5-9.0$ Resalto estable. ....	32
<b>Figura 2.13</b> $F1>9.0$ Resalto fuerte. ....	32
<b>Figura 2.14</b> Efecto de la de la profundidad de salida en la formación de un resalto hidráulico aguas abajo de un vertedero. ....	35

<b>Figura 2.15</b> Disipador por Resalto Hidráulico (Caso 1). “Resalto Hidráulico Normal” . . . . .	36
<b>Figura 2.16</b> Disipador por Resalto Hidráulico (Caso 2), “Resalto Hidráulico Desplazado” . . . . .	37
<b>Figura 2.17</b> Disipador por Resalto Hidráulico (Caso 3). “Resalto Hidráulico Sumergido” . . . . .	38
<b>Figura 2.18</b> Disipador Tipo USBR III . . . . .	39
<b>Figura 2.19</b> Disipador Tipo Tanque por cambio de profundidad . . . . .	40
<b>Figura 2.20</b> Disipador de Tanque por cambio de ancho . . . . .	40
<b>Figura 2.21</b> Disipador Tipo Salto Esquí . . . . .	41
<b>Figura 2.22</b> Disipador Tipo Salto Esquí Sumergido . . . . .	42
<b>Figura 2.23</b> Disipador Tipo Salto Esquí Estriado . . . . .	43
<b>Figura 3.1</b> Perfil en función de la carga del proyecto ( $H_o=1.3$ cm) . . . . .	46
<b>Figura 3.2</b> Tipos de transiciones . . . . .	47
<b>Figura 3.3</b> Esquema del Vertedero de demasías simple . . . . .	47
<b>Figura 3.4</b> Esquema del perfil con las alturas conocidas . . . . .	48
<b>Figura 3.5</b> Medidas recomendadas para el deflector . . . . .	49
<b>Figura 3.6</b> Esquema Vertedero de Demasías con salto esquí . . . . .	50
<b>Figura 3.7</b> Esquema de los canales a utilizar en el modelo . . . . .	50
<b>Figura 3.8</b> Esquema de la mesa soporte . . . . .	51
<b>Figura 3.9</b> Esquema de los perfiles metálicos . . . . .	52
<b>Figura 3.10</b> Esquema de la tubería . . . . .	53
<b>Figura 3.11</b> Esquema del tanque de almacenamiento con las medidas mínimas necesarias . . . . .	53

<b>Figura 3.12</b> Esquema del embudo.....	54
<b>Figura 3.13</b> Esquema de la placa perforada.....	55
<b>Figura 3.14</b> Esquema final del modelo Hidráulico. ....	55
<b>Figura 4.1</b> Diagrama de la conexión eléctrica.....	61
<b>Figura 5.1</b> Resultados de resalto hidráulico para un obstáculo de 0.015 cm de altura. ....	76
<b>Figura 5.2</b> Resultados de resalto hidráulico para un obstáculo de 0.02 cm de altura. ....	78
<b>Figura 5.3</b> Resultados de resalto hidráulico para un obstáculo de 0.025 cm de altura. ....	80
<b>Figura 5.4</b> Resultados de resalto hidráulico para un obstáculo de 0.03 m de altura. ....	82
<b>Figura 5.5</b> Resultados para el disipador tipo esquí.....	88
<b>Figura 5.6</b> Resultados para el disipador tipo esquí sumergido. ....	93

## LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

<b>Fotografía 4.1</b> Construcción de la mesa metálica. ....	57
<b>Fotografía 4.2</b> Perfiles metálicos. ....	57
<b>Fotografía 4.3</b> Construcción del tablero. ....	58
<b>Fotografía 4.4</b> Acrílico. ....	59
<b>Fotografía 4.5</b> Unión de la tubería. ....	60
<b>Fotografía 4.6</b> Conexión de la botonera a la bomba. ....	61
<b>Fotografía 4.7</b> Mangueras acopladas al modelo hidráulico. ....	62
<b>Fotografía 4.8</b> Colocación del embudo en el tablero. ....	63
<b>Fotografía 4.9</b> Desagüe en los embalses. ....	64
<b>Fotografía 4.10</b> Desagüe en el tanque reservorio. ....	64
<b>Fotografía 4.11</b> Corte láser de acrílico. ....	65
<b>Fotografía 4.12</b> Funcionamiento del vertedor sin placa perforada. ....	65
<b>Fotografía 4.13</b> Funcionamiento del vertedor con placa perforada. ....	66
<b>Fotografía 4.14</b> Modelo construido (vistas laterales). ....	66
<b>Fotografía 4.15</b> Modelo construido (vistas frontales). ....	67
<b>Fotografía 5.1</b> Comprobación de la altura sobre la cresta del vertedero. ....	69
<b>Fotografía 5.2</b> Resalto hidráulico desplazado. ....	84
<b>Fotografía 5.3</b> Resalto hidráulico normal. ....	84
<b>Fotografía 5.4</b> Resalto hidráulico desplazado. ....	85
<b>Fotografía 5.5</b> Funcionamiento del dissipador tipo esquí. ....	90
<b>Fotografía 5.6</b> Funcionamiento del dissipador tipo esquí sumergido. ....	95

## NOMENCLATURA UTILIZADA

**L** = longitud

**m** = masa

**a** = aceleración

**g** = aceleración de la gravedad

$\rho$  = densidad del fluido

**L** = longitud

**p** = diferencia de presión

**A** = área

$\mu$  = viscosidad dinámica

$\sigma$  = tensión superficial

$\frac{\partial v}{\partial y}$  = gradiente transversal de velocidades

**V** = velocidad

**e** = escala

**v** = viscosidad

**E** = módulo de elasticidad

**F** = fuerza

$\mathbb{V}$  = volumen

**t** = tiempo

**Q** = caudal

**P** = presión

**W** = trabajo

**P** = Potencia

**S** = Pendiente

**P<sub>m</sub>** = Perímetro Mojado

**R<sub>H</sub>** = Radio Hidráulico

**n** = Coeficiente de Rugosidad

**Y** = Profundidades

**C** = coeficiente de descarga

**H<sub>o</sub>** = carga hidráulica del proyecto

**R** = radio

**Φ** = diámetro

**ℝ** = número de Reynolds

**F** = número de Froude

# CAPÍTULO I

## 1. MODELAJE HIDRÁULICO

### 1.1. Introducción

Los fenómenos hidráulicos, como expresión del mundo natural, son tan complejos que no es posible analizarlos y describirlos totalmente. Sólo podemos hacerlo parcialmente. Uno de los instrumentos más poderosos que se dispone para tratar de conocer y comprender el comportamiento del agua en la naturaleza y su interacción con las estructuras se encuentra en la investigación mediante modelos matemáticos y físicos.

Modelo es toda esquematización de la realidad hecha con fines de estudio. Todas las ciencias de los objetos reales trabajan con situaciones idealizadas que constituyen inevitablemente simplificaciones (deformaciones de la realidad)<sup>1</sup>, es decir modelo es una representación cualitativa y/o cuantitativa de un sistema, en el cual se muestran las relaciones predominantes entre sus elementos. Por esta razón, un modelo no puede incluir todos los aspectos de un sistema real, sino solamente los más importantes, este debe ser bastante detallado si se desea representar válidamente el problema real.

Cuando la teoría requerida para algún diseño es incompleta, inaplicable o inexistente debe recurrirse a la investigación en modelo.

---

<sup>1</sup> Rocha Arturo, Los modelos como herramienta para el diseño hidráulico. Pág. 3

Para la construcción de un modelo se debe tomar en cuenta la importancia de la estructura que se está estudiando. Si se trata de una estructura de gran costo y complejidad, cuya falla acarrearía graves consecuencias se debe necesariamente investigar en un modelo. Pero, si se trata de una estructura pequeña, fácilmente reparable y cuya destrucción o colapso no tuviese consecuencias graves, podría no requerirse un estudio en modelo hidráulico.

## **1.2. Clases de modelos**

### **1.2.1. Modelos Matemáticos**

El conjunto de hipótesis y relaciones de las variables que describen un fenómeno hidráulico, constituyen un modelo matemático (ecuaciones), que conduce a un problema matemático que es necesario resolver mediante técnicas apropiadas.<sup>2</sup>

En los modelos matemáticos deben tomarse en cuenta los siguientes factores:

- Exactitud de los datos iniciales
- Tipo de fenómeno a estudiar
- Exactitud de las ecuaciones que rigen el fenómeno
- Forma de aproximar las ecuaciones y evolución del modelo

Los modelos Matemáticos requieren información que a menudo se deriva de los modelos físicos.

---

<sup>2</sup> <http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/articulopagppal.html>

La secuencia del desarrollo de un modelo matemático consta de seis etapas que a continuación se describen:

- Descripción del fenómeno, planteándose las variables que intervienen y las hipótesis del comportamiento de la misma.
- Planteamiento de las ecuaciones que describen matemáticamente el fenómeno (modelo matemático), las condiciones de frontera y la variabilidad de solución.
- Seleccionar el método de solución del modelo matemático, es decir la elección del algoritmo de cálculo.
- Programación del algoritmo de cálculo si se va a realizar en una computadora.
- Calibración, verificación y validación del modelo
- Utilización del modelo con base en datos de campo, de experimentos en laboratorios o de supuestos para obtener predicciones.

### **1.2.2. Modelos Físicos Reducidos**

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

Una de las dificultades que presenta la modelación matemática, es la idealización de los fenómenos, en la cual se realizan simplificaciones

importantes; estas sólo pueden ser valoradas por medio de pruebas experimentales aplicadas a modelos físicos de escala.

Un modelo físico reducido es una representación a escala de una situación hidráulica de flujo, se puede usar para predecir el comportamiento del sistema en algún aspecto deseado. El sistema físico para el que se hacen las predicciones se denomina prototipo. Los modelos físicos generalmente son de menor tamaño que los prototipos, pueden usar fluidos distintos y con frecuencia en diferentes condiciones (presiones, velocidades, etc.).

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

La investigación en un modelo físico permite visualizar el comportamiento de la estructura en tres dimensiones, pudiendo intuir posibles problemas que no habrían sido descubiertos durante el diseño convencional.

Los modelos físicos se diseñan y operan de acuerdo a las leyes de escala, es decir, las condiciones que deben satisfacerse para lograr la similitud entre el modelo y prototipo.

Los modelos se clasifican según su fondo, teniendo dos tipos:

Modelos de fondo fijo, si el estudio involucra la reproducción de flujo supercrítico, transiciones, patrones de ondas, perfiles de la superficie del agua, o estructuras en general.

Modelos de fondo móvil, el modelo debe simular movimiento del agua y de los sedimentos<sup>3</sup>.

### **1.3. Similitud**

El uso de modelos hidráulicos a escala reducida, implica que éstos deben ser semejantes al prototipo, para lo cual debe satisfacerse ciertas leyes que relacionan magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas.

La similitud geométrica implica una relación constante entre longitudes.

Cuando la comparación entre el prototipo y modelo es con respecto a un movimiento, se establece entonces la similitud cinemática.

El movimiento de un fluido en el modelo y prototipo, para que sea similar en forma completa, no es suficiente con que se cumpla con las similitudes geométrica y cinemática, también es necesario tomar en consideración la acción de fuerzas sobre las partículas de un fluido, tales como fricción, tensión superficial, fuerzas de inercia, etc. Lo anterior implica que la relación de fuerzas homólogas también debe ser constante, estableciéndose así la similitud dinámica.

---

<sup>3</sup> Richard French, Hidráulica de Canales Abiertos. Pág. 653

### 1.3.1. Similitud Geométrica

Un modelo y un prototipo son geoméricamente similares si todas las dimensiones del cuerpo en cada una de las direcciones de los ejes coordenados se relacionan mediante la misma escala de longitudes.

El modelo y prototipo deben ser idénticos en forma y únicamente diferir en el tamaño. Por tanto cualquier longitud del prototipo puede obtenerse multiplicando su longitud homóloga en el modelo por la escala.

$$L_p = L_e * L_m$$

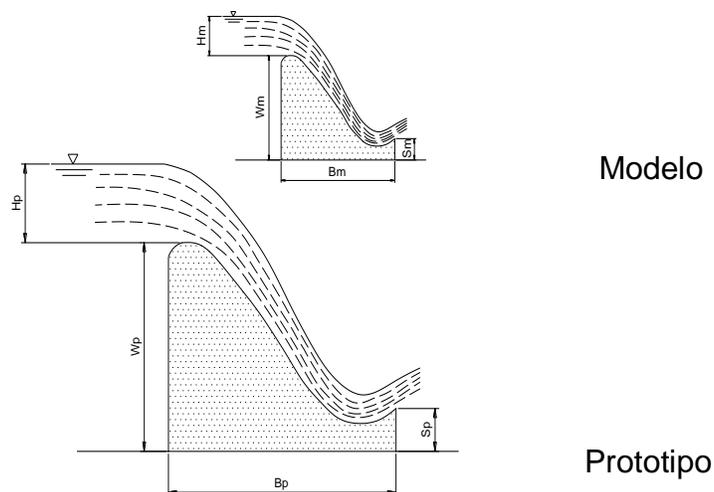
**Ecuación 1.1**

Donde:

$L_p$  = Longitud del prototipo

$L_m$  = Su longitud homóloga en el modelo

$L_e$  = Escala



**Figura 1.1** Similitud Geométrica.

### 1.3.2. Similitud Cinética

Un modelo y un prototipo tienen similitud cinética si partículas homólogas llegan a puntos homólogos en tiempos homólogos.

La relación de velocidades entre puntos debe ser constante y se denominada escala de velocidades. Es un requisito que se cumpla con la similitud geométrica para que se cumpla la similitud cinemática.

$$V_e = V_p / V_m$$

**Ecuación 1.2**

$$T_e = T_p / T_m$$

**Ecuación 1.3**

Donde:

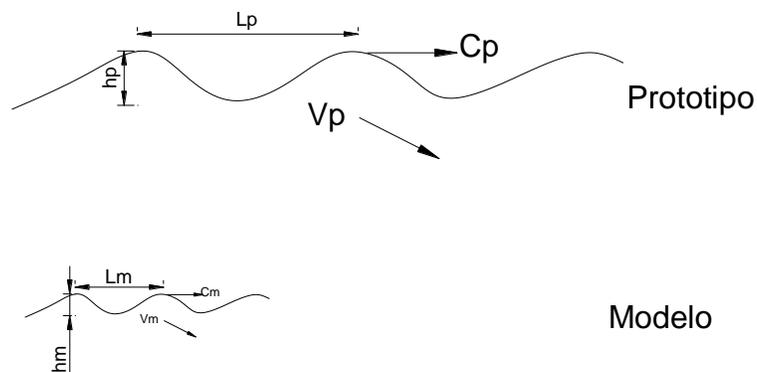
$V_e$  = escala de velocidades

$T_e$  = escala de tiempos

El cumplimiento de este tipo de semejanza obliga a que haya similitud geométrica; cuando ambas se cumplen, las direcciones del flujo en puntos homólogos del prototipo y modelo son semejantes, es decir, la forma de las líneas de corriente es la misma en modelo y prototipo<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Canizalez Casillas, R. Apuntes sobre teoría de modelos de obras hidráulicas a superficie libre.



**Figura 1.2** Similitud Cinética.

Puesto que hay una escala de velocidades y de tiempos, se cumple que existe una escala de aceleraciones,  $a_e$  dada por:

$$a_e = a_p/a_m = V_e/T_e$$

**Ecuación 1.4**

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

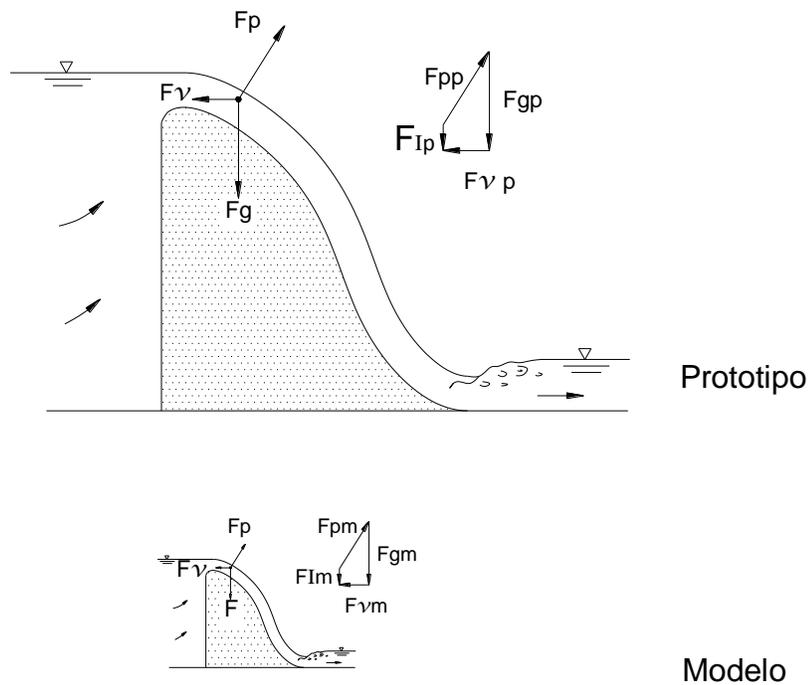
### 1.3.3. Similitud Dinámica

Un modelo y un prototipo tienen similitud dinámica si las fuerzas ejercidas por el fluido en puntos homólogos del modelo y prototipo se relacionan entre sí mediante un valor fijo,  $F_e$  (escala de fuerzas).

Para que se cumpla la similitud dinámica se debe cumplir también la geométrica y cinética.

Las fuerzas que actúan sobre una partícula de fluido pueden ser debido a la gravedad,  $F_g$  a la presión  $F_p$ , a la viscosidad  $F_v$  y a la tensión superficial  $F_\sigma$ .

Si la suma de esas fuerzas más la inercia  $F_I$  no es igual a cero, la partícula se acelerará. Por razones de equilibrio la suma de las fuerzas anteriores incluida la fuerza de inercia  $F_I$ , es igual a cero, cumpliéndose la Ecuación 1.5.



**Figura 1.3** Similitud Dinámica.

$$F_g + F_p + F_v + F_\sigma + EL^2 + F_I = 0$$

**Ecuación 1.5**

Cada fuerza se expresa de la siguiente manera:

$$\sum F - m \cdot a = 0$$

$$F = m \cdot a$$

$$Fg = m \cdot g = \rho (L^3)g$$

**Ecuación 1.6**

$$Fp = (\Delta p) A$$

**Ecuación 1.7**

$$Fv = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \mu (V) L$$

**Ecuación 1.8**

$$F\sigma = \sigma (L)$$

**Ecuación 1.9**

$$F_I = m \cdot a = \rho (L^3) \frac{L}{T^2} = \rho (V^2) L^2$$

**Ecuación 1.10**

Donde:

m = masa

a = aceleración

g = aceleración de la gravedad

 $\rho$  = densidad del fluido

L = longitud

 $p$  = diferencia de presión

A = área

 $\mu$  = viscosidad dinámica $\sigma$  = tensión superficial $\frac{\partial v}{\partial y}$  = gradiente transversal de velocidades

V = velocidad

$\nu$  = viscosidad

E = módulo de elasticidad

La semejanza dinámica implica que se cumpla:

$$F_e = \frac{F_{gp}}{F_{gm}} = \frac{F_{pp}}{F_{pm}} = \frac{F_{vp}}{F_{vm}} = \frac{F_{Ip}}{F_{Im}} = \frac{F_{\sigma p}}{F_{\sigma m}}$$

**Ecuación 1.11**

Si en el fenómeno por estudiar, dos de las fuerzas se consideran despreciables con respecto a la inercia, por ejemplo las fuerzas de presión y viscosas, se cumple lo siguiente:

$$\frac{F_{Ip}}{F_{gp}} = \frac{F_{Im}}{F_{gm}}$$

**Ecuación 1.12**

Si las fuerzas viscosas son las únicas de importancia, se obtiene que:

$$\frac{F_{Ip}}{F_{vp}} = \frac{F_{Im}}{F_{vm}}$$

**Ecuación 1.13**

Si no intervienen las fuerzas gravitacionales y viscosas se llega a:

$$\frac{F_{Ip}}{F_{pp}} = \frac{F_{Im}}{F_{pm}}$$

**Ecuación 1.14**

Los cocientes entre las fuerzas dadas en las ecuaciones definen parámetros adimensionales de la hidráulica.

### 1.3.3.1. Número de Froude

El número de Froude<sup>5</sup> es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido. De esta forma el número de Froude se puede escribir como:

$$F = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza gravitatoria}} = \frac{\rho (V^2) L^2}{\rho (L^3) g} = \frac{V^2}{g L} = \frac{V}{\sqrt{g L}}$$

**Ecuación 1.15**

### 1.3.3.2. Número de Reynolds

El número de Reynolds se define como la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas.

$$R = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza viscosa}} = \frac{\rho (V^2) L^2}{\mu (V) L} = \frac{V L}{\mu / \rho} = \frac{V L}{\nu}$$

**Ecuación 1.16**

### 1.3.4. Leyes de Similitud Dinámica

Existe semejanza dinámica entre un prototipo y su modelo, cuando las fuerzas generadas en el interior del fluido en puntos

---

<sup>5</sup> Debe su nombre al ingeniero hidrodinámico y arquitecto naval inglés William Froude (1810 - 1879)

homólogos están relacionadas entre sí, y tal relación es única y constante para todas las fuerzas.

Generalmente en un escurrimiento en particular no todas las fuerzas son importantes, algunas pueden llegar a ser despreciables. Cuando esto ocurre la similitud dinámica se alcanza con un razonable grado de precisión.

Algunas relaciones que deben cumplirse entre las escalas cuando una fuerza tiene predominio sobre las demás son:

#### **1.3.4.1. Condición de Froude**

Rige aquellos escurrimientos en que la fuerza más importante es la de la gravedad y en los que puede despreciarse los efectos viscosos, como ocurre en escurrimientos turbulentos a superficie libre.

Cuando las fuerzas de gravedad e inercia son las únicas a considerar se cumple la Ecuación 1.12 y considerando las expresiones de esas fuerzas dadas por las ecuaciones Ecuación 1.6 y Ecuación 1.10 tanto para modelo como para prototipo, se establece que:

$$\frac{V_e}{\sqrt{g_e L_e}} = 1$$

**Ecuación 1.17**

Expresión conocida como condición de Froude y que indica la relación que tiene que existir entre las escalas cuando se desean representar adecuadamente los escurrimientos en que la fuerza predominante es debida a la gravedad.

El cumplimiento de la condición de Froude obliga a que el número de Froude del escurrimiento sea idéntico en modelo y prototipo.

$$F = \frac{V_p}{\sqrt{g_p L_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m L_m}}$$

**Ecuación 1.18**

Donde:

$\frac{V_e}{\sqrt{g_e L_e}}$  Se denomina número de Froude

$L$  Dimensión característica

Al tener la Ecuación 1.17 con tres variables, pueden escogerse dos libremente. Una de ellas es la escala de gravedad, ya que prácticamente tiene valor constante e igual a uno.

La segunda escala que puede escogerse sería la de longitudes, ya que así fijaríamos el tamaño del modelo. Una vez seleccionadas  $g_e$  y  $L_e$ , la escala de velocidades nos quedaría:

$$V_e = (g_e)^{1/2} (L_e)^{1/2}$$

$$V_e = L_e^{1/2}$$

**Ecuación 1.19**

A partir de la Ecuación 1.19 y considerando  $g_e = 1$ , se obtendrán las escalas restantes para modelos de Froude no distorsionados ya que bajo esta condición se encuentran los modelos de obras hidráulicas a superficie libre. Observando que en el modelo y prototipo se cumpla la semejanza geométrica, cinemática y dinámica.

La mayoría de los modelos en que se estudian obras hidráulicas, fluviales y marítimas cumplen con la condición de Froude, tales como: obras de excedencia y disipadores de energía (tanques amortiguadores, saltos de esquí, cubetas deflectoras, etc.), escurrimiento en canales y ríos y comportamiento de obras que se construyen en ellos, estructuras o fenómenos bajo la acción del oleaje y mareas (modelos de escolleras).

**1.3.4.2. Condición de Reynolds**

Cuando en un escurrimiento la viscosidad del líquido gobierna o interviene en forma preponderante en el fenómeno por estudiar entre el modelo y el prototipo se dice que este problema se encuentra bajo la condición de Reynolds y se cumplirá la siguiente igualdad:

$$\frac{V_e L_e}{\nu_e} = 1$$

**Ecuación 1.20**

Donde  $\nu_e$  es la escala de viscosidad cinemática la cual es válida para leyes a poca velocidad, un número de Reynolds grande indica una preponderancia marcada de las fuerzas de inercia sobre las fuerzas viscosas. La Ecuación 1.20 garantiza la similitud dinámica, cuando las únicas fuerzas de interés se deben a la inercia y a la viscosidad del fluido. El cumplimiento de la condición de Reynolds obliga a que los números de Reynolds en modelo y prototipo sean iguales, es decir deberá cumplirse la siguiente igualdad:

$$\mathbb{R} = \frac{V_p L_p}{\nu_p} = \frac{V_m L_m}{\nu_m}$$

**Ecuación 1.21**

La Ecuación 1.20 al igual que la Ecuación 1.17, permite para resolverla, la selección de dos escalas, generalmente, la de viscosidad y la de longitudes. La primera implica la libertad de seleccionar el fluido del modelo y la segunda, el tamaño. Quedando por lo tanto la escala de velocidades de la siguiente manera:

$$Ve = \frac{v_e}{L_e}$$

**Ecuación 1.22**

Obteniéndose las demás escalas de manera similar a la condición de Froude. A partir de esta última expresión al igual que para la condición de Froude y Reynolds, se obtienen los valores de las escalas de longitudes para otras condiciones; para el estudio de obras hidráulicas a superficie libre se requiere solamente del uso de las escalas bajo la condición de Froude.

La condición de Reynolds deben cumplir modelos donde se estudian el empuje y sustentación de cuerpos sumergidos en un flujo, flujos laminares y de transición en tuberías, medidores de gasto, transiciones en conductos, etc.

A continuación se presenta un resumen de los valores de las escalas de longitudes para las condiciones de Froude y de Reynolds.

**Tabla 1.1** Valores de las escalas de longitudes para las condiciones de Froude y de Reynolds.

Característica	Ecuación	Condición de Froude	Condición de Reynolds
<b>Geométrica</b>			
Longitud Horizontal	$L_h$	$L_e$	$L_e$
Longitud Vertical	$L_v$	$L_e$	$L_e$
Área	$A = (L)^2$	$A_e = (L_e)^2$	$(L_e)^2$
Volumen	$\mathbb{V} = (L)^3$	$\mathbb{V}_e = (L_e)^3$	$(L_e)^3$
<b>Cinémática</b>			
Tiempo	$t = \frac{L}{V}$	$t_e = \left(\frac{L_e}{g_e}\right)^{1/2}$	$\frac{(L_e)^2}{v_e}$
Velocidad	$V = \frac{L}{t}$	$V_e = (g_e L_e)^{1/2}$	$\frac{v_e}{L_e}$
Aceleración	$g = \frac{V}{t}$	$g_e$	$\frac{(v_e)^2}{(L_e)^3}$
Gasto	$Q = A(V)$	$Q_e = [g_e(L_e)^5]^{1/2}$	$v_e(L_e)$
<b>Dinámica</b>			
Masa	$m = \mathbb{V}$	$m_e = \gamma_e(L_e)^3$	$\rho_e(L_e)^3$
Fuerza	$F = m(a)$	$F_e = \gamma_e(L_e)^3$	$\rho_e(v_e)^2$
Presión	$p = \frac{F}{A}$	$p_e = \gamma_e(L_e)$	$\frac{\rho_e(v_e)^2}{(L_e)^2}$
Trabajo	$W = F(L)$	$W_e = \gamma_e(L_e)$	$\rho_e(v_e)^2 L_e$
Potencia	$P = \frac{W}{t}$	$P_e = \left[\frac{(\gamma_e)^3(L_e)^7}{\rho_e}\right]^{1/2}$	$\frac{\rho_e(v_e)^3}{L_e}$
<b>Hidráulica</b>			
Pendiente	$S = \frac{L_v}{L_H}$	$S_e = 1$	1
Perímetro mojado	$P_m$	$P_{m_e} = L_e$	$L_e$
Radio Hidráulico	$R_H = \frac{A}{P_m}$	$R_{H_e} = L_e$	$L_e$
Coefficiente de Rugosidad	$n = \frac{(R_H)^{2/3}(S)^{1/2}}{V}$	$n_e = \frac{(L_e)^{1/2}}{(g_e)^{1/2}}$	*

\*Se utilizan otros criterios para calcular el coeficiente de rugosidad.

#### 1.4. Escala

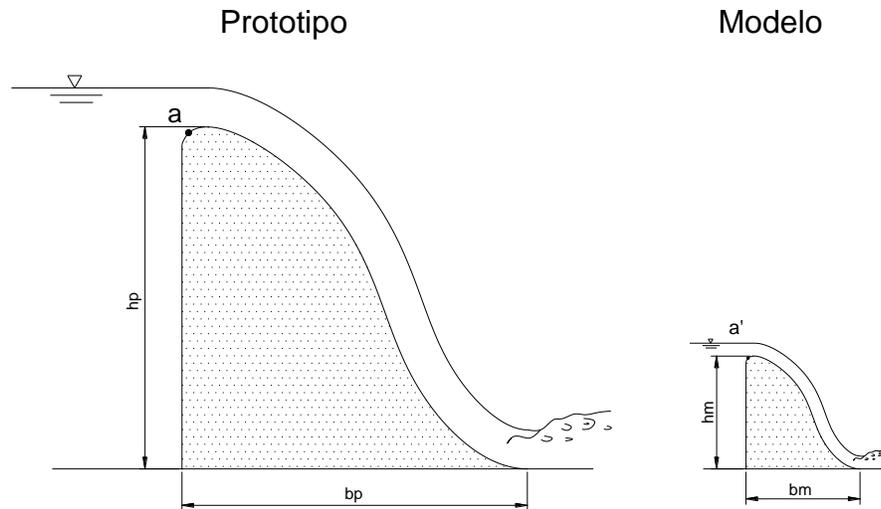
La escala es la relación que existe entre una magnitud del prototipo y su correspondiente en modelo. Se representa con el símbolo de la variable tratada, a la cual se añade el subíndice e.

Se denomina escala de longitudes aquella relación que guarda el cociente de longitudes homólogas correspondientes, la cual debe ser constante.

Cuando dos o más magnitudes semejantes se relacionan con dos o más escalas diferentes, se dice que existe distorsión. Generalmente se dice que un modelo es distorsionado cuando se utilizan dos escalas para relacionar sus dimensiones geométricas, es decir, se tiene una de longitudes verticales,  $L_{V_e}$  y otra para las longitudes horizontales,  $L_{h_e}$

Se pueden construir varios modelos a escalas diferentes y obtener buenos resultados en todos los casos, sin embargo existen escalas que son más apropiadas para la reproducción correcta de cierto fenómeno, o puede ocurrir que de un mismo prototipo se deban hacer dos o más modelos a escalas diferentes, para obtener en cada uno de ellos un fenómeno diferente.

Al tratar con modelo y prototipo, se denomina puntos homólogos aquellos que tienen correspondencia geométrica. Por lo tanto: partes homólogas son aquellas formadas con puntos homólogos.



**Figura 1.4** Escala y Puntos Homólogos.

Los puntos a y a' son homólogos

$$b_p / b_m = h_p / h_m = \dots = L_e \text{ (Escala de Longitudes)}$$

#### 1.4.1. Consideraciones para seleccionar la Escala

Para la selección de escalas se requiere no sólo el conocimiento profundo de las circunstancias teóricas aplicables, sino también las vinculadas al laboratorio en el que se va a realizar la investigación, tales como:

- Espacio de Laboratorio
- Abastecimiento de agua.
- Capacidad de bombas instaladas
- Precisión de los instrumentos existentes
- Tiempo
- Dinero

Los modelos de vertederos, conductos y otras estructuras que tengan superficies relativamente suaves, las escalas varían entre 1:50 a 1:15 (distancia en el modelo: distancia en el prototipo) estos modelos nunca deben distorsionarse<sup>6</sup>.

#### **1.4.2. Efectos de Escala**

Es el error en que se incurre al utilizar el modelo según una ley determinante principal e ignorar las otras.

Los efectos de escala pueden definirse como las distorsiones introducidas por efectos de gravedad, viscosidad, tensión superficial, etc. diferentes del que predomina. Esto ocurre cuando uno o más parámetros adimensionales son diferentes entre el modelo y el prototipo. Es decir, errores que resultan al modelar el prototipo con base en escalas escogidas para satisfacer la acción de la fuerza dominante y permitir que las otras fuerzas no estén a escalas.

Los modelos geoméricamente similares casi siempre introducen inevitablemente algún grado de distorsión del flujo y algunos efectos de escala.

Estos efectos también influyen en la selección de la escala del modelo, ya que afecta el funcionamiento del prototipo. Los efectos de escala aparecen con cierta frecuencia en muchos modelos, para evitar esto se deben construir modelos tan grandes como sean posibles.

---

<sup>6</sup> Richard H. French HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS. Pág. 649

En un modelo grande tanto la construcción de la estructura como la medición de los caudales es más exacta, pero la operación es más complicada, así como también el tiempo de observación es excesivo.

## CAPÍTULO II

### 2. FUNDAMENTO TEÓRICO PRESAS

#### 2.1. Introducción

Para el consumo e irrigación de agua es indispensable su almacenamiento, las presas son estructuras hidráulicas construidas a través de una corriente para facilitar esta labor. Las presas o vertedores de descarga libre (demasías) son aquellos en los que el agua cae libremente, incluye en general tres secciones: una cresta, una rápida y un dissipador de energía en el extremo aguas abajo (Figura 2.1).

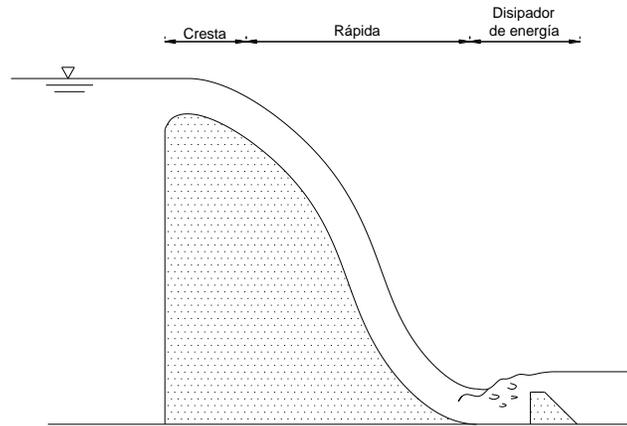
Durante eventos de lluvia importantes, una gran cantidad de agua fluye hacia el embalse y el nivel de éste puede subir por encima de la cresta de la presa. Las aguas de la creciente pueden ser descargadas por debajo de la presa (alcantarilla, descarga de fondo), a través de la presa (presa de enrocado) o por encima de las presas (vertederos de demasías)<sup>7</sup>.

La rápida sirve para transportar el agua a través de la presa.

El dissipador de energía fragmenta la energía cinética de flujo en el extremo aguas abajo de la rápida.

---

<sup>7</sup> Hubert Chanson, Hidráulica de flujo. Pág. 358



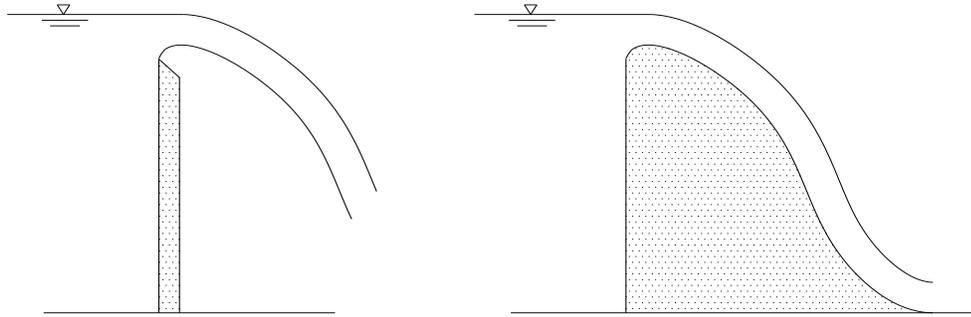
**Figura 2.1** Partes del Vertedero de demasías.

## 2.2. Cresta

La cresta de un vertedero de descarga usualmente se diseña para maximizar la capacidad de caudal de la estructura, es decir para pasar en forma segura el caudal de diseño con un costo mínimo.

Para las descargas efectuadas con la carga del proyecto, el agua se desliza sobre la cresta sin interferencia de la superficie que limita y alcanza casi su eficiencia máxima de descarga.

Las secciones de las crestas cuya forma se aproxima a la de la superficie de la lámina que sale por un vertedor en pared delgada (Figura 2.2), constituye la forma ideal para obtener óptimas descargas. La forma de esta sección depende de la carga, inclinación de la cara de aguas arriba de la sección vertedora sobre el piso de canal de llegada (que influye en la velocidad de llegada a la cresta).



**Figura 2.2** Perfil de la lámina de agua que sale de un vertedor de pared delgada.

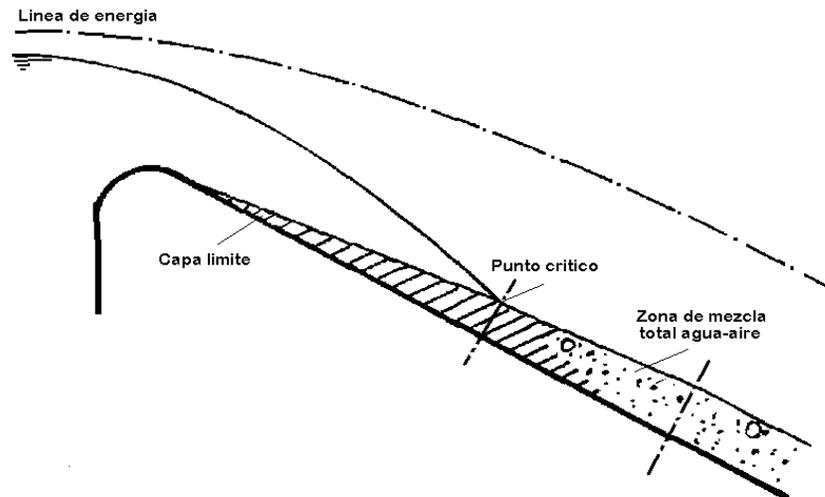
### 2.3. Rápida

Una vez que el flujo de agua pasa la cresta, el fluido es acelerado por la gravedad a lo largo de la rápida. La aceleración dependerá de la inclinación de la misma.

En la rápida el flujo se desarrolla con velocidades que se van incrementando en proporción directa a  $\sqrt{2gh}$ , pudiendo alcanzar tensiones de corte mayores a las que puede resistir el material con el que está construido.

Se observa que la superficie del agua, después de un recorrido liso en un principio, comienza a absorber aire a partir de un punto determinado. La turbulencia del flujo es responsable del proceso de formación de la mezcla agua-aire (Figura 2.3).

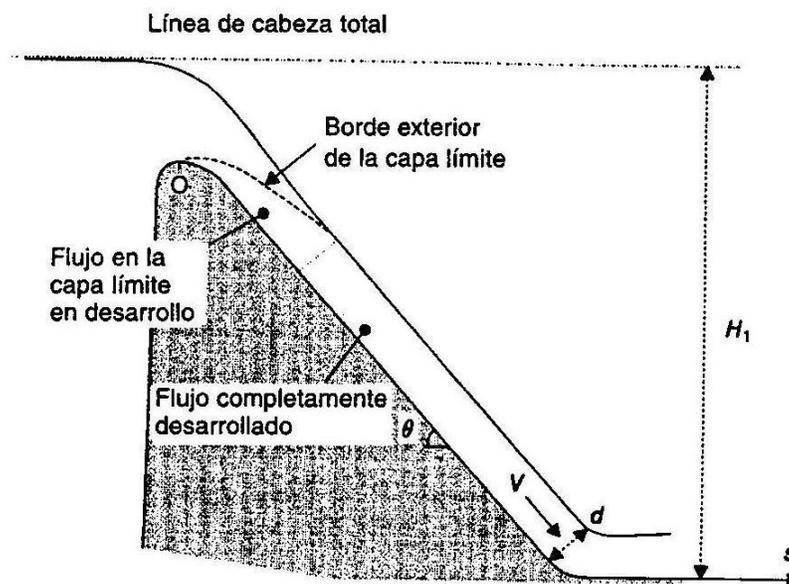
Si el agua escurriendo libremente, rompe contacto con la superficie del vertedor, se forma un vacío en el punto de la separación, pudiendo ocurrir la cavitación.



**Figura 2.3** Comportamiento del agua en la rápida.

Las rápidas más comunes son las lisas y escalonadas (Figura 2.4 y Figura 2.5). Ocurre una mayor disipación de energía en vertederos con rápidas escalonadas comparado con rápidas lisas.

Es ideal que la pendiente de la rápida no sea superior a 1:4 (H:V), 75.96 grados.



**Figura 2.4** Esquema de una rápida lisa.

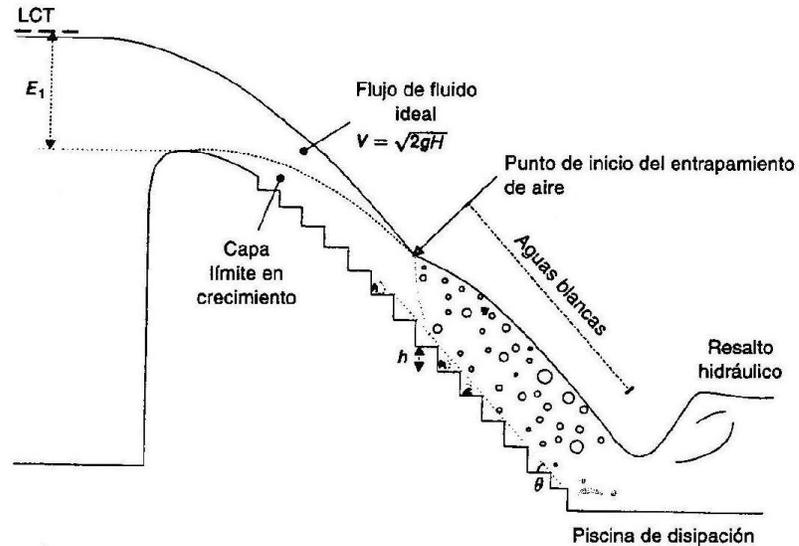


Figura 2.5 Esquema de una rápida escalonada.

## 2.4. Disipadores de Energía

Cuando el agua que pasa por el vertedor de demasías cae del nivel del embalse al nivel del río aguas abajo, la carga estática se convierte en energía cinética. Esta energía se manifiesta en la forma de altas velocidades que si se trata de disminuirlas producen grandes presiones. Por lo tanto, generalmente deben disponerse medios que permitan descargar el agua en el río sin erosiones o socavaciones peligrosas en la presa y que no produzcan daño en las estructuras adyacentes.

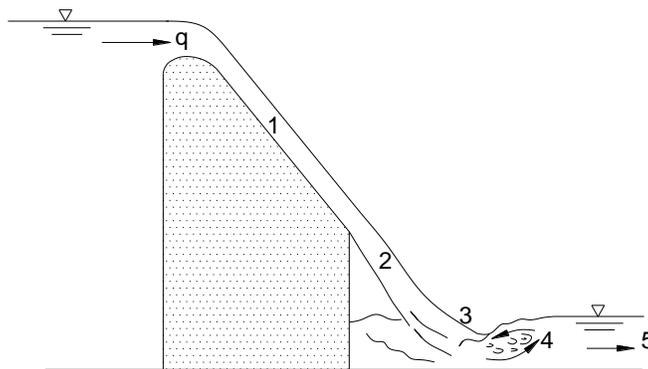
En algunos casos, la descarga se puede hacer a altas velocidades directamente en la corriente en la que sea absorbe la energía a lo largo del cauce por impacto, turbulencia y rozamiento (trampolines). Este método es satisfactorio cuando existe roca firme con tirantes de poca profundidad en el canal.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> U.S.B.R., Diseño de Presas Pequeñas, Pág. 331

Cuando no se puede tolerar la erosión, se puede hacer un estanque artificial para la formación del resalto, construyendo una presa auxiliar aguas debajo de la estructura principal o excavando un estanque que se recubra de concreto.

El paso del agua desde el embalse hasta el tramo aguas abajo involucra varios fenómenos hidráulicos, se puede considerar cinco etapas en el proceso de disipación de energía, algunas de las cuales pueden estar combinadas o ausentes:

1. Sobre la superficie del vertedero
2. En el chorro de caída libre
3. En el Impacto en el pozo aguas abajo
4. En el resalto hidráulico
5. En el afluente del río

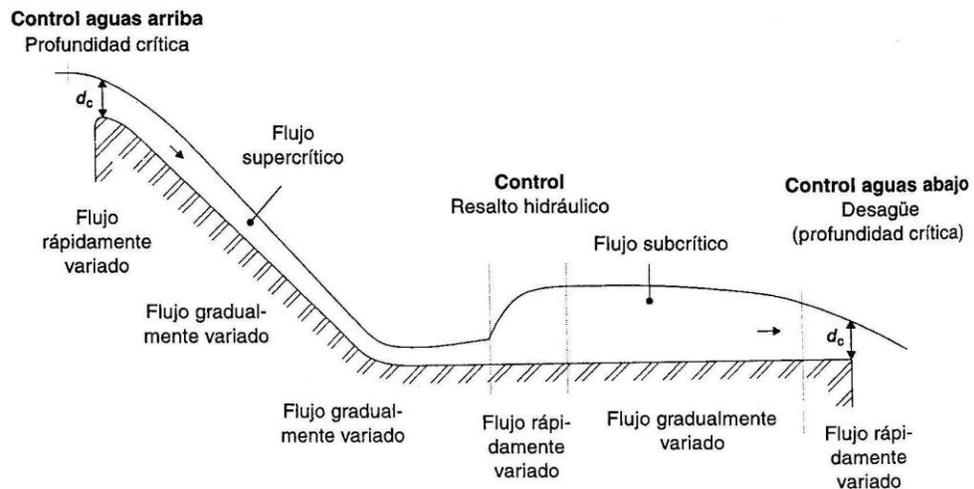


**Figura 2.6** Etapas de la disipación de energía.

La disipación de energía en vertederos de demasías se alcanza principalmente al resalto hidráulico que se produce luego del impacto del agua en el tanque de amortiguación.

### 2.4.1. Análisis del Resalto Hidráulico

La transición de flujo supercrítico a subcrítico (Figura 2.7) se conoce como “Resalto Hidráulico”. Un resalto hidráulico se caracteriza por el desarrollo de turbulencia de gran escala, por ondas superficiales y por rocío, disipación de energía y entrapamiento de aire. La región de turbulencia de gran escala se conoce como “remolino”. Un resalto hidráulico es una región de flujo de variación rápida.



**Figura 2.7** Transición de Flujo.

- Si el Número de Froude es mayor a la unidad ( $F > 1$ ), el flujo se denomina supercrítico.
- Si el Número de Froude es igual a la unidad ( $F = 1$ ), el flujo se denomina crítico.

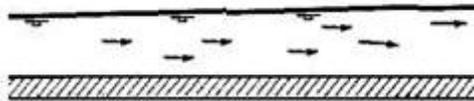
- Si el Número de Froude es menor a la unidad ( $F < 1$ ), el flujo se denomina subcrítico.

#### 2.4.1.1. Tipos de Resalto hidráulico

Existen diferentes tipos de resalto hidráulico en canales horizontales, cuya base de clasificación es el número de Froude aguas arriba (antes que se produzca el resalto):

$$Fr_1 = 1$$

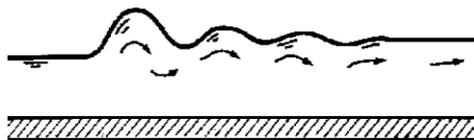
Flujo crítico, por lo que no se forma ningún resalto.



**Figura 2.8**  $Fr_1 = 1$  No se forma resalto

$$Fr_1 = 1 \text{ a } 1.7$$

La superficie de agua presenta la tendencia a la formación de ondulaciones. Pérdidas de energía insignificantes.



**Figura 2.9**  $Fr_1=1-1.7$  Resalto ondulante.

### $Fr_1 = 1.7$ a $2.5$

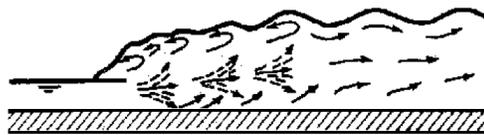
Se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme. La velocidad a través de la sección es uniforme y la pérdida de energía es baja, se forma un resalto débil.



**Figura 2.10**  $Fr_1 = 1.7-2.5$  Resalto débil.

### $Fr_1 = 2.5$ a $4.5$

Resalto oscilante inestable. Se producen ondas largas de periodo irregular. Cada oscilación irregular produce una ola grande la cual viaja lejos hacia aguas abajo, dañando y erosionando las orillas, se produce un resalto oscilante.



**Figura 2.11**  $Fr_1 = 2.5 - 4.5$  Resalto oscilante.

### $Fr_1 = 4.5$ a $9.0$

La extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos sensibles a la

variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado y su comportamiento es el mejor. La disipación de energía varía de 45% a 70%, se forma un resalto estable.



**Figura 2.12**  $Fr_1 = 4.5-9.0$  Resalto estable.

### **$Fr_1 > 9.0$**

El chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo, y puede prevalecer una superficie rugosa. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85%, se forma un resalto fuerte.



**Figura 2.13**  $F_1 > 9.0$  Resalto fuerte.

#### **2.4.1.2. Longitud del resalto hidráulico**

Aunque la longitud de un resalto es un parámetro muy importante en el diseño, ésta no puede establecerse a partir de consideraciones teóricas; los resultados de algunas investigaciones experimentales han resultado contradictorias.

La longitud del resalto hidráulico se define como la distancia entre la cara frontal del inicio del resalto, hasta un punto inmediato donde finaliza el resalto hidráulico. Esta longitud se ha determinado en forma experimental, en base a las alturas, antes y después del resalto. En el análisis de resaltos hidráulicos en canales con pendiente apreciables, es muy importante considerar la componente del peso en la dirección del movimiento. Las ecuaciones desarrolladas para el cálculo de la longitud no toman en cuenta esta condición.

## 2.4.2. Tipos de Disipadores de Energía

### 2.4.2.1. El Resalto Hidráulico como disipador de energía

Para un flujo supercrítico en una canal rectangular horizontal, la energía del flujo se disipa a través de la resistencia friccional a lo largo del canal, dando como resultado un descenso en la velocidad y un incremento en la profundidad en la dirección del flujo. Un resalto hidráulico se formará en el canal si el número de Froude  $F_1$  del flujo, la profundidad de flujo  $Y_1$  y la profundidad  $Y_2$  aguas abajo satisfacen la ecuación:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1/2 \left( \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

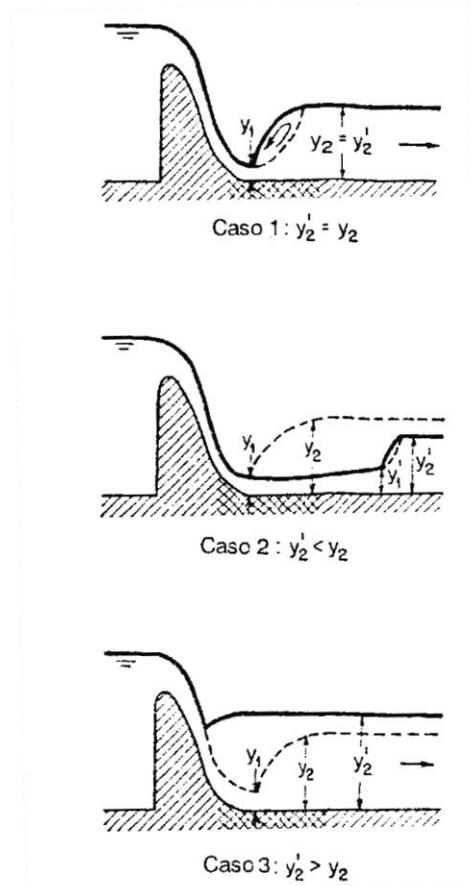
**Ecuación 2.1**

Desde un punto de vista práctico, el resalto hidráulico es un medio útil para disipar el exceso de energía en un flujo supercrítico. Su merito está en prevenir la posible erosión aguas abajo de vertederos de demasías, rápidas y compuertas deslizantes, debido a que reduce rápidamente la velocidad del flujo sobre un piso protegido hasta un punto donde el flujo pierde su capacidad de socavar el lecho del canal natural aguas abajo.

El resalto hidráulico utilizado para la disipación de energía a menudo se confina parcial o totalmente en un tramo del canal que se conoce como cuenco de disipación o cuenco de aquietamiento, cuyo fondo se recubre para resistir la socavación.

En la práctica, el cuenco disipador rara vez se diseña para confinar toda la longitud de un resalto hidráulico libre sobre la zona revestida, debido a que sería muy costoso. En consecuencia, a menudo se instalan accesorios para controlar el resalto dentro del cuenco. El principal propósito de este control es acortar el rango dentro del cual el resalto ocurrirá y por consiguiente reducir el tamaño y el costo del cuenco disipador. El control tiene ventajas adicionales, debido a que mejora la función de disipación del cuenco, estabiliza la acción del resalto y, en algunos casos, incrementa el factor de seguridad.

Existen tres modelos alternativos (Figura 2.14) que permiten que un resalto se forme aguas debajo de un vertedero de demasías:

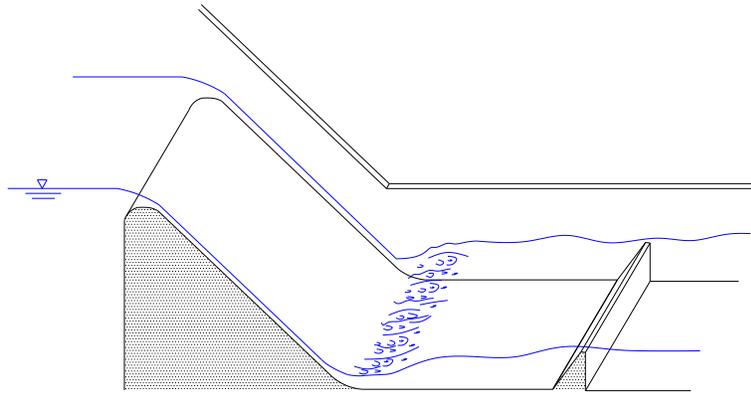


**Figura 2.14** Efecto de la de la profundidad de salida en la formación de un resalto hidráulico aguas abajo de un vertedero.

#### 2.4.2.1.1. Caso 1

El caso 1 representa el modelo para el cual la profundidad de aguas abajo  $y_2'$  es igual a la profundidad  $Y_2$  seciente a  $y_1$ . En este caso los valores de  $F_1$ ,  $y_1$  y  $y_2'$ (=  $y_2$ ) satisfarán la Ecuación 2.1 y el resalto ocurrirá sobre un piso sólido inmediatamente adelante de la

profundidad  $y_1$ . Para propósitos de protección contra la socavación, éste es un caso ideal. Una objeción importante a este modelo, sin embargo, es que una pequeña diferencia entre los valores reales y supuestos de los coeficientes hidráulicos relevantes puede causar que el resalto se mueva hacia aguas abajo desde su posición estimada. En consecuencia, siempre es necesario algún dispositivo para controlar su posición.

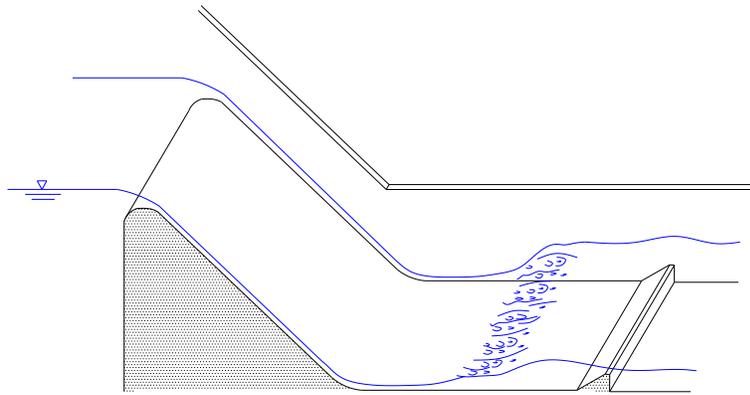


**Figura 2.15** Disipador por Resalto Hidráulico (Caso 1). “Resalto Hidráulico Normal”.

#### 2.4.2.1.2. Caso 2

El caso 2 representa el patrón para el cual la profundidad de salida  $y_2'$  es menor que  $y_2$ . Esto significa que la profundidad de salida del caso 1 se disminuye. Como resultado, el resalto se desplazará hacia aguas abajo hasta un punto donde se satisfaga nuevamente la Ecuación 2.1. En lo posible, este caso debe evitarse en

el diseño, debido a que el resalto es rechazado fuera de la zona resistente a la socavación dando como resultado una erosión. La solución para el diseño es utilizar cierto control en el fondo del canal, el cual incrementará la profundidad de agua a la salida y asegurará un resalto dentro de la zona protegida.

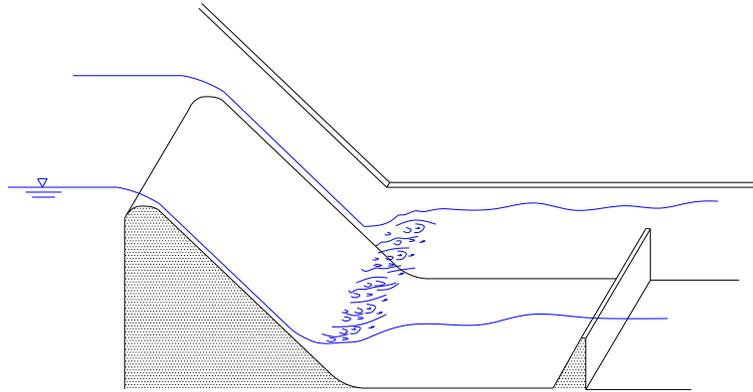


**Figura 2.16** Disipador por Resalto Hidráulico (Caso 2), "Resalto Hidráulico Desplazado".

#### 2.4.2.1.3. Caso 3

El caso 3 representa un modelo en el cual la profundidad de salida  $y_2'$  es mayor que  $y_2$ . Esto significa que la profundidad de salida con respecto al caso 1 se incrementa. Como resultado, el resalto se verá forzado hacia aguas arriba, y finalmente puede ahogarse en la fuente y convertirse en un resalto sumergido. Éste tal vez es el caso más seguro para el diseño, debido a que

la posición del resalto sumergido puede fijarse con rapidez. Infortunadamente el diseño no es eficiente, debido a que se disipará muy poca energía.



**Figura 2.17** Disipador por Resalto Hidráulico (Caso 3). “Resalto Hidráulico Sumergido”.

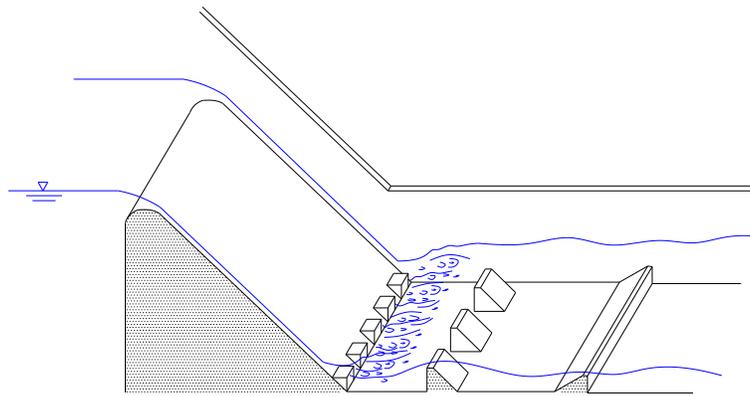
#### 2.4.2.2. Disipador Bureau of Reclamation III

Este tipo de disipador es básicamente el mismo al utilizado mediante un resalto hidráulico, pero con objeto de controlar el resalto se emplean dos tipos de bloques deflectores a la entrada al tanque y un umbral en el extremo como se muestra en la Figura 2.18.

Los bloques pueden ser en forma de deflector o de cubos, ambas son eficaces. Las esquinas no se redondean ya que esto reduce la disipación de energía.

En general, se encuentran espaciados de modo regular con separaciones entre sí aproximadamente iguales a su

ancho. Los umbrales que se colocan en el extremo aguas abajo del tanque son triangulares, con objeto de ayudar a mantener el salto dentro del tanque y permitir un acortamiento del mismo. El tanque debe revestirse con concreto de alta calidad para prevenir los posibles daños causados por la erosión y la cavitación. No se pueden permitir irregularidades en el piso o en las paredes laterales.

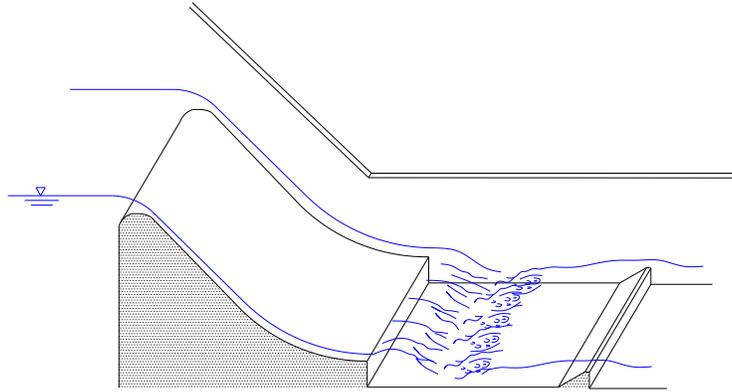


**Figura 2.18** Disipador Tipo USBR III.

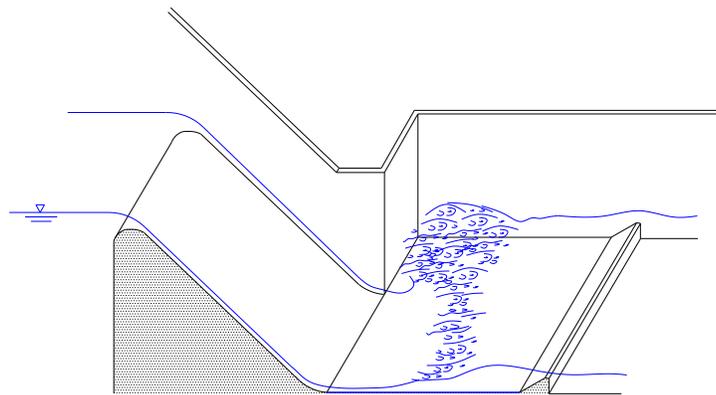
#### **2.4.2.3. Disipador de Tanque**

El tanque de amortiguación 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 para lograr esta transición del flujo consiste en un simple resalto sumergido, formado en un tanque de amortiguación de sección transversal rectangular. Pueden

producirse variando la altura que cae el agua del vertedero, o cambiando el ancho al pie de la estructura vertedora<sup>9</sup>.



**Figura 2.19** Dissipador Tipo Tanque por cambio de profundidad.



**Figura 2.20** Dissipador de Tanque por cambio de ancho.

#### 2.4.2.4. Salto Esquí

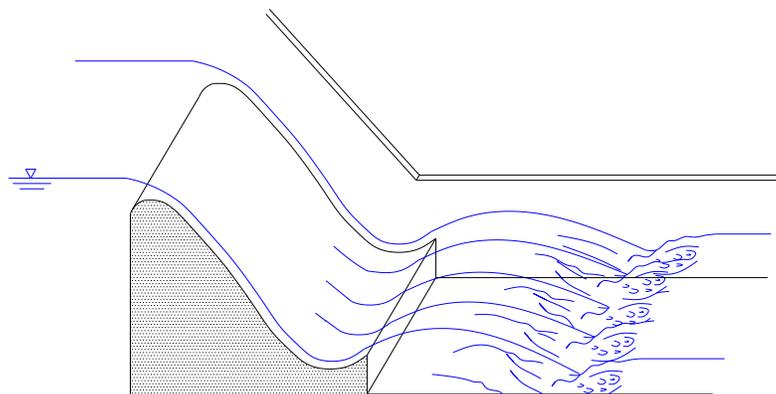
Cuando la descarga de los vertederos puede hacerse directamente sobre el río, el chorro se proyecta lejos de la estructura por medio de un deflector terminal o trampolín. El agua en estas estructuras sale como un chorro libre y cae en el

<sup>9</sup> Novak P., Moffat A.I.B., Nalluri C., ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS. Pág. 213

cauce a una distancia del extremo del vertedor. La trayectoria del chorro depende de la energía del flujo en el extremo y del ángulo con el que el chorro sale del trampolín.

Esta se hace directamente sobre el río. Se utilizan unos trampolines para hacer saltar el flujo hacia un punto aguas abajo reduciendo así la erosión en el cauce y el pie de la presa. En este sistema, la energía es disipada por tres acciones, por el contacto aire-agua (parte de la energía es disipada en el aire), por la turbulencia del agua y por la fricción del flujo con el cauce del río.

Este tipo de disipación de energía hidráulica se utiliza para grandes descargas, permitiendo importantes ahorros en sitios donde las condiciones geológicas y morfológicas sean favorables.

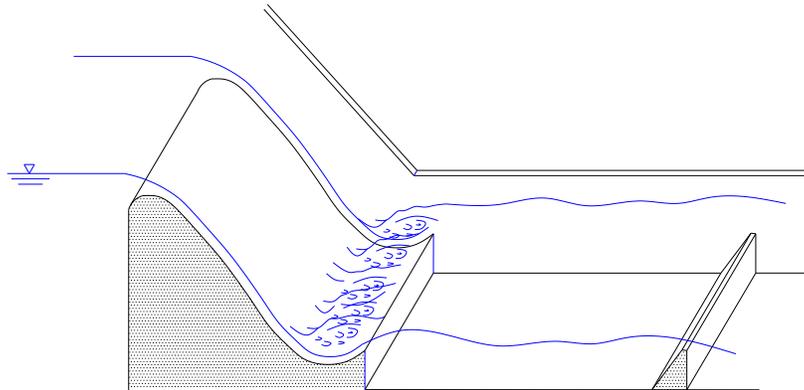


**Figura 2.21** Disipador Tipo Salto Esquí.

#### 2.4.2.5. Salto Esquí Sumergido

El funcionamiento hidráulico de este tipo de disipador se manifiesta por la formación del resalto hidráulico en la superficie del esquí.

El uso de los disipadores esquí sumergido puede ser perjudicial debido al desgaste que produce en las superficies de concreto, causado por el material que regresa a lo largo del borde del deflector debido al remolino en el fondo.

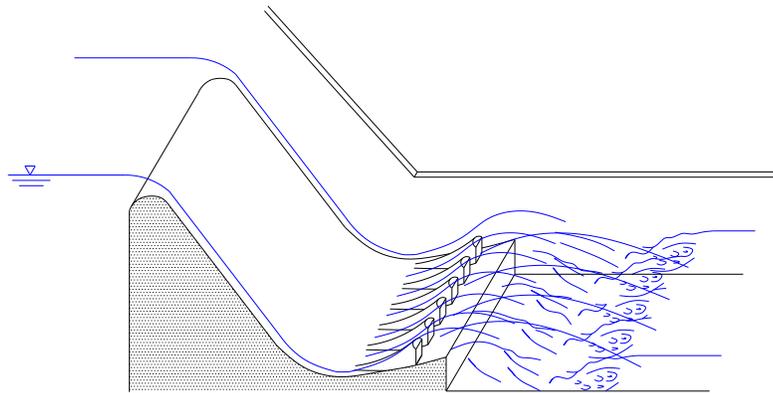


**Figura 2.22** Disipador Tipo Salto Esquí Sumergido.

#### 2.4.2.6. Salto Esquí Estriado

Este tipo de disipador contiene estrías en el deflector obligando a separar el agua, el chorro de alta velocidad sale del borde con un ángulo menor, y solamente parte del chorro de alta velocidad va a dar a la superficie. De esta forma se produce una turbulencia menor en la superficie del vertedero,

evitando así su erosión<sup>10</sup>. Este tipo de disipador es más eficiente que el disipador esquí liso, ya que la corriente de agua es dividida por las estrías acelerando la dispersión de energía, el disipador tipo esquí estriado puede o no ser sumergido dependiendo las profundidades del cauce.



**Figura 2.23** Disipador Tipo Salto Esquí Estriado.

---

<sup>10</sup>Diseño de presas pequeñas - Pág. 331

## **CAPÍTULO III**

### **3. DIMENSIONADO**

#### **3.1. Introducción**

El modelo será utilizado por los estudiantes de la carrera de ingeniería civil para reforzar los conocimientos hidráulicos, por lo que las medidas del mismo serán las más convenientes para su fácil manejo, según lo descrito en el capítulo 1, sección 1.4.

#### **3.2. Vertederos**

Para un mejor aprendizaje y aprovechando la variedad de tipos de vertederos, se tendrán dos tipos: un vertedero de demasías simple que servirá para analizar el resalto hidráulico y un vertedero con deflector para el salto esquí.

##### **3.2.1. Cálculo de la carga del proyecto.**

Para determinar el perfil de los dos tipos de vertederos se procederá como primer paso a calcular la carga máxima a la que trabajaran.

La bomba a utilizar tiene una potencia de 0.5 hp, nos arroja un caudal de 0.67 lt/seg, medido mediante aforos, el ancho asumido de la cresta será de 0.20 m, con estos datos remplazamos en la siguiente ecuación (unidades inglesas), que calcula el caudal que pasa por la cresta del vertedero, esta ecuación y teoría se aplica sólo si el flujo de

aproximación es subcrítico, para flujos subcríticos el perfil se calcula en función del número de Froude.

$$Q = CLho^{3/2}$$

**Ecuación 3.1**

**Donde:**

Q es la descarga en pies cúbicos por segundo

C coeficiente de descarga

L es la longitud de la cresta en pies

ho es la carga del proyecto o altura de energía sobre la cresta.

Cuando la velocidad de aproximación del agua en la cresta es insignificante el coeficiente adimensional C es 4.03.<sup>11</sup>

$$(0.00067) * (1/0.3048^3) = (4.03) * (0.20) * (1/0.3048) * ho^{3/2}$$

$$ho = 0.04309 \text{ ft}$$

$$ho = 0.01313 \text{ m}$$

La carga con la que se diseñarán los vertederos será de 1.3 cm.

### 3.2.1.1. Vertedero de demasías simple

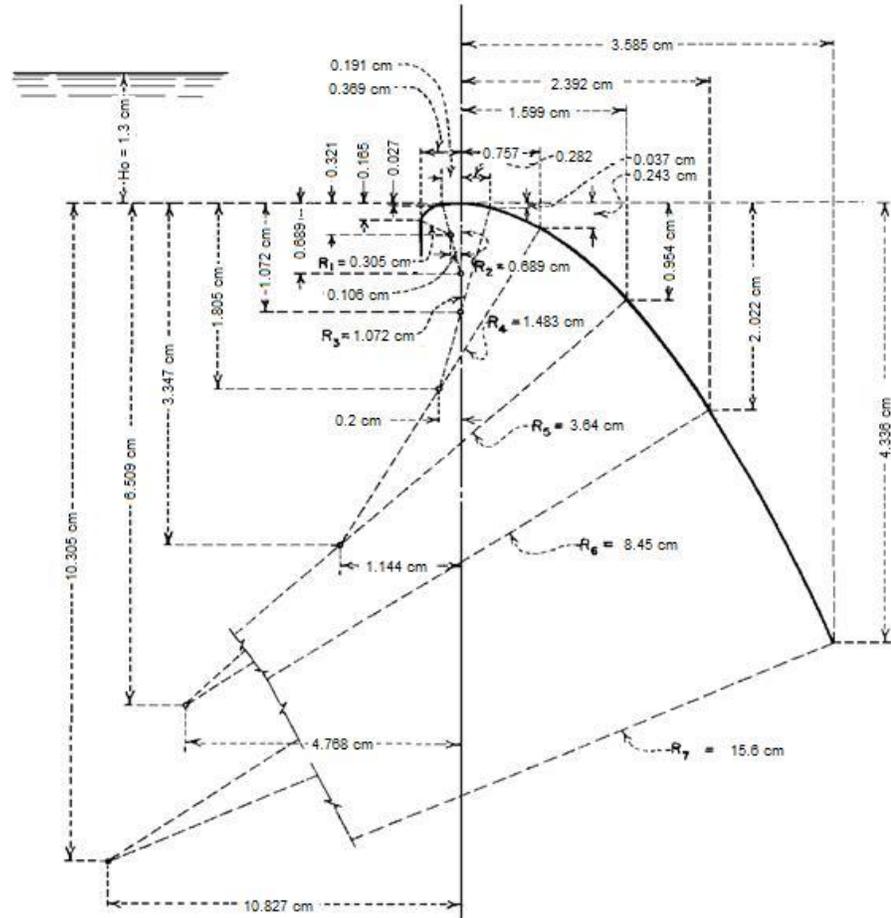
La forma aproximada de la sección para una cresta con paramento de aguas arriba vertical y velocidad de llegada despreciable, se muestra en la Figura 3.1. La sección está construida como una curva circular compuesta con los radios

---

<sup>11</sup> Ven Te Chow, Hidráulica de canales abiertos, Pág. 358

expresados en función de la carga de proyecto<sup>12</sup>,  $H_o$ . Esta definición es más sencilla que otras formas de cresta, ya que elimina la necesidad de resolver una ecuación exponencial, además se presenta en una forma que puede ser usada por personas no preparadas en la construcción de moldes o plantillas.

Utilizando la carga calculada para el proyecto ( $H_o$ ) de 1.3 cm se tiene el siguiente perfil:

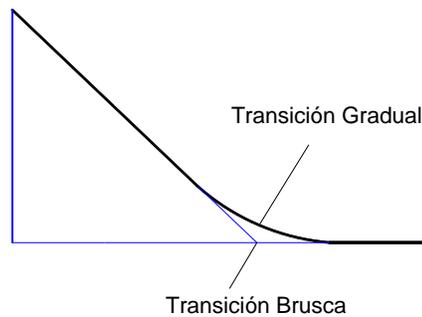


**Figura 3.1** Perfil en función de la carga del proyecto ( $H_o=1.3$  cm).

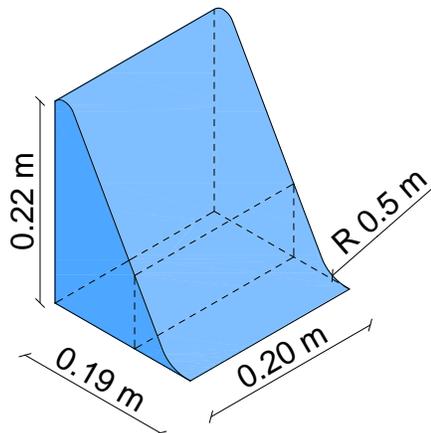
<sup>12</sup> U.S.B.R., Diseño de Presas Pequeñas. Pág. 307

Tanto para el vertedero de demasías simple y vertedero con deflector se escogerá la rápida tipo lisa por facilidad de construcción, con una inclinación de  $60^\circ$ .

La transición entre el vertedero y el cauce puede ser gradual o brusca como se indica en la Figura 3.2, para evitar erosiones al pie del vertedero se recomienda la transición gradual.



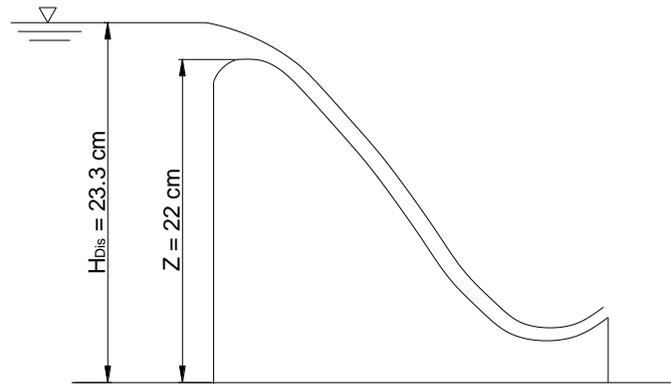
**Figura 3.2** Tipos de transiciones.



**Figura 3.3** Esquema del Vertedero de demasías simple.

### 3.2.1.2. Vertedero de demasías con Salto Esquí

Para el segundo vertedero de demasías se usará el perfil de Creager<sup>13</sup>, ya que es uno de los más usuales.



**Figura 3.4** Esquema del perfil con las alturas conocidas.

Utilizando la ecuación para formar el perfil Creager, con las medidas de la Figura 3.4, se tiene:

$$Y = 0.47 \frac{X^{1.8}}{(H_{DIS} - Z)^{0.8}}$$

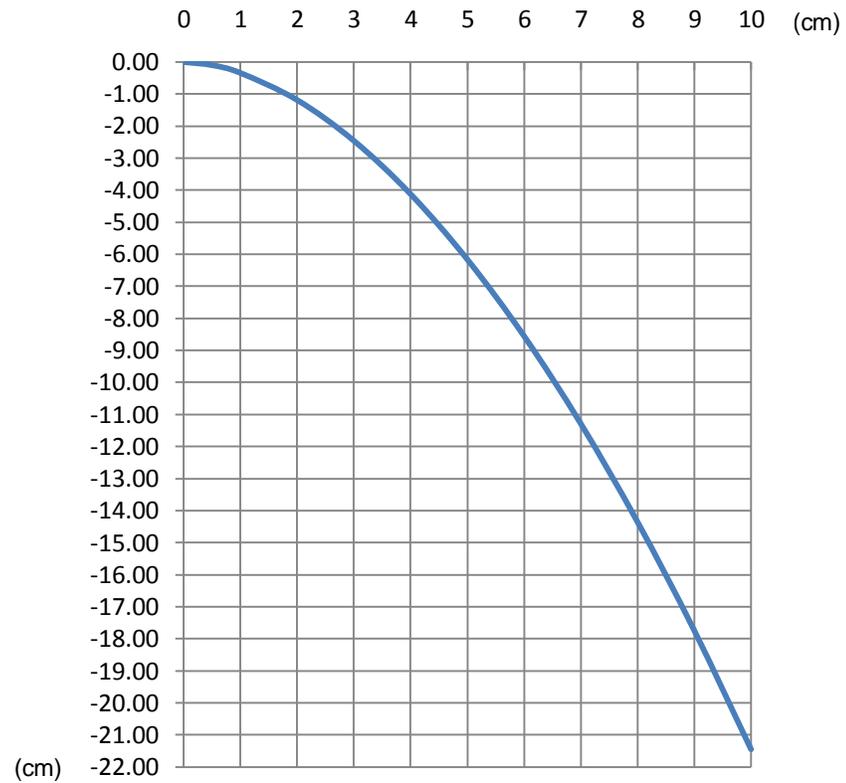
**Ecuación 3.2**

**Tabla 3.1** Valores de las coordenadas (en cm) del perfil Creager.

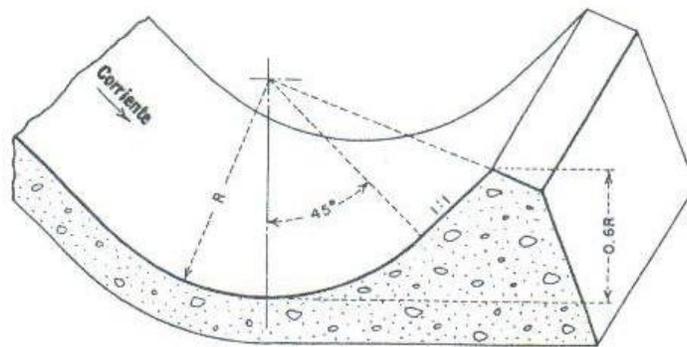
X	Y
0	0.00
0.5	-0.10
1	-0.34
2	-1.18
3	-2.45
4	-4.12
5	-6.16
6	-8.55
7	-11.28
8	-14.35
9	-17.74
10	-21.44

<sup>13</sup> Deducido de los experimentos de Bazin (1888 – 1898).

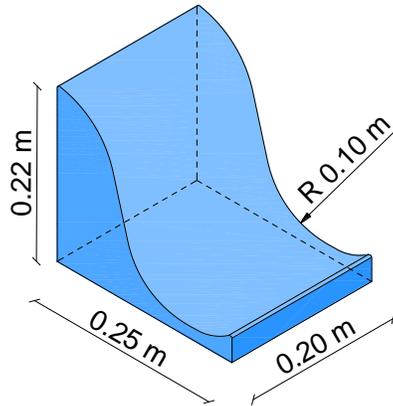
**Gráfico 3.1** Perfil de Creager para el proyecto.



Para obtener el efecto de esquí se construirá al final del vertedero un deflector, con un radio de 0.10 m.



**Figura 3.5** Medidas recomendadas para el deflector.

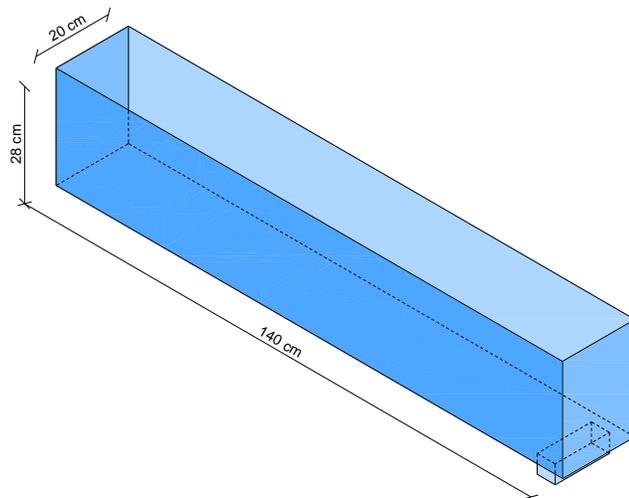


**Figura 3.6** Esquema Vertedero de Demasías con salto esquí.

### 3.3. Canales

Los canales en los cuales se acoplarán los vertederos tendrán un ancho de 0.20 m, una altura de 0.28 m de alto y una longitud de 1.40 m. para simular de mejor manera el lecho de un río

En la parte final de los canales tendrán una perforación que enviará el agua hacia el sistema de recirculación.



**Figura 3.7** Esquema de los canales a utilizar en el modelo.

### 3.4. Estructuras metálicas

#### 3.4.1. Mesa Soporte

Las medidas adoptadas para la mesa soporte están determinadas según el ancho de la mesa, que deberá acoger a los dos canales que deberán tener además un espaciamiento entre ellos, por lo que el ancho mínimo será de:

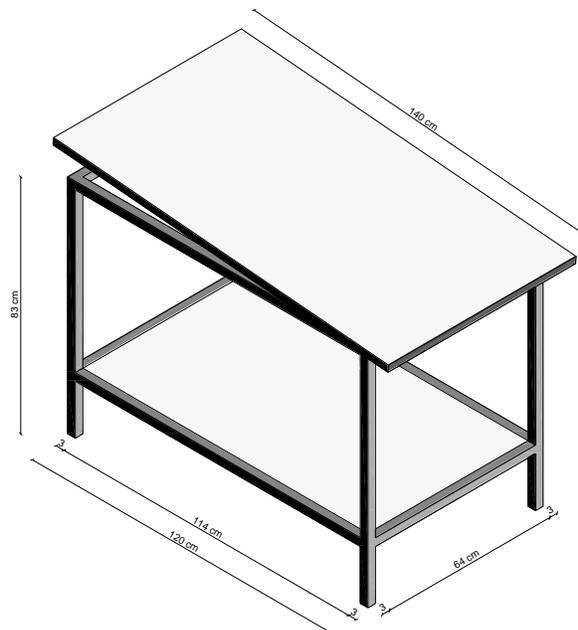
Canal 1            0.20 m

Canal 2            0.20 m

Espaciamientos  0.30 m

Ancho mínimo de la mesa = 0.70 m

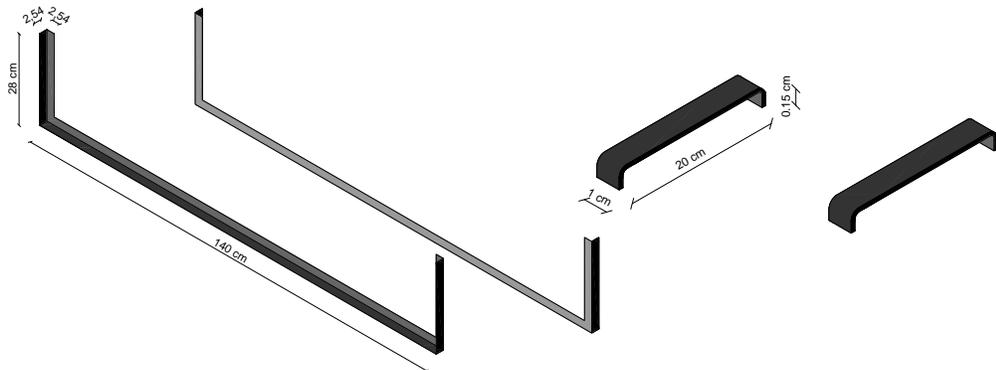
La altura de la mesa está sujeta a las medidas de una persona promedio entre el piso y la cintura, por lo que la altura será 0.83 m. El largo de la mesa deberá ser el mismo que el de los canales para apoyarlos completamente es decir 1.40 m.



**Figura 3.8** Esquema de la mesa soporte.

### 3.4.2. Perfiles Metálicos

Las paredes de acrílico estarán en gran parte llenas de agua, esta generará una presión lateral que tratará de abrir las paredes, para contrarrestar esto se colocarán perfiles metálicos a cada lado de los canales, uniéndose cada par de perfiles en la parte superior de los extremos mediante unas platinas dobladas en forma de C.



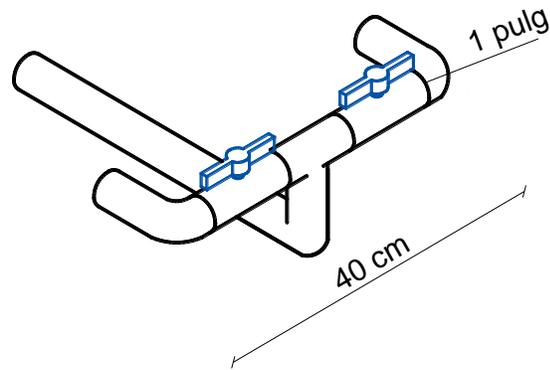
**Figura 3.9** Esquema de los perfiles metálicos.

### 3.5. Tubería

La bomba tiene una entrada y salida de agua de 1 pulgada de diámetro, adoptando esta medida para la tubería.

Para proveer de agua a ambos canales se realizará una conexión provista de llaves para regular el caudal, procurando que las entradas de la tubería lleguen al centro de las paredes laterales de los canales.

La conexión con el tanque de almacenamiento se debe hacer mediante adaptadores de tanque.

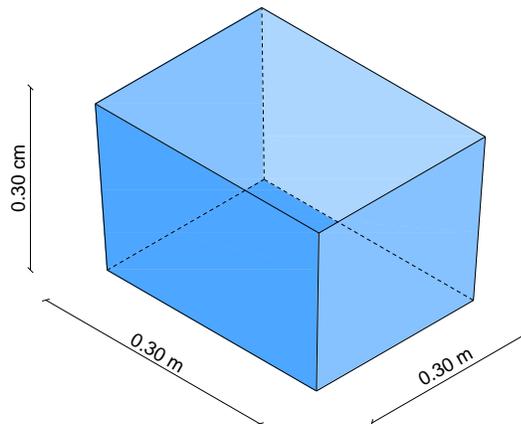


**Figura 3.10** Esquema de la tubería.

### 3.6. Tanque

Para que el sistema este en constante funcionamiento necesita un tanque reservorio, el cual sea el que provea de agua a la bomba y a su vez recepte con facilidad el agua para su reutilización.

Se necesitará almacenar para los embalses 2 (0.20 x 0.20 x 0.2) m<sup>3</sup>, más una cierta cantidad de agua que se mantendrá en las tuberías y circulando a través de los canales, por lo que el tanque deberá almacenar un mínimo de 30 litros para el correcto funcionamiento de la bomba y evitar daños en la misma.



**Figura 3.11** Esquema del tanque de almacenamiento con las medidas mínimas necesarias.

### 3.7. Embudo

Para recibir las aguas que provienen de los canales se colocará un sistema de captación que enviará el líquido hacia el tanque de almacenamiento de forma rápida y segura.

La medida mínima del ancho del embudo debe ser la de canales incluido un espaciamiento entre ellos, es decir aproximadamente 0.50 m, las paredes laterales tendrán una inclinación de 20 grados para evitar el estancamiento de líquido que saldrá por una perforación lateral de 0.05 m de diámetro.

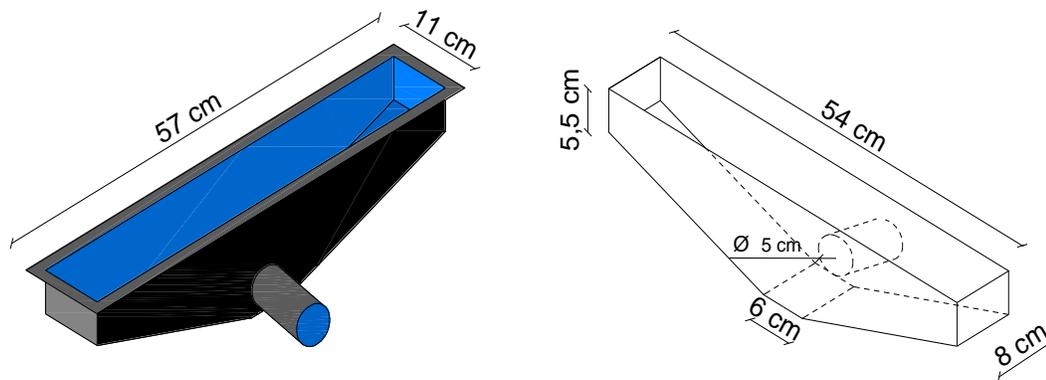
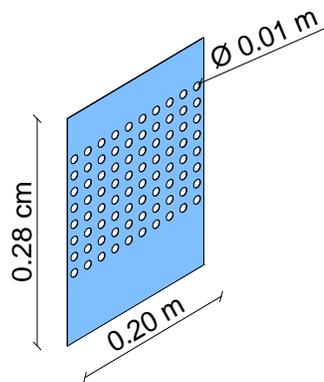


Figura 3.12 Esquema del embudo.

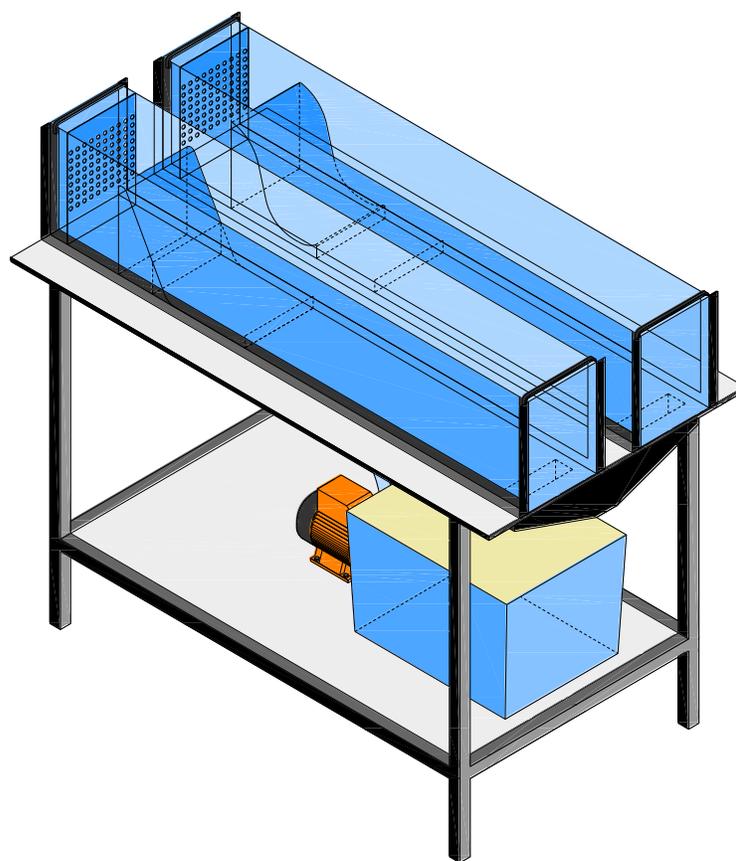
### 3.8. Placa perforada

Para evitar que el flujo de salida en el vertedero sea turbulento, por la descarga desde la bomba se colocará en el embalse de los canales una placa de acrílico con perforaciones, esta ayudará a que el flujo se estabilice. Las medidas serán las mismas que la del canal, con agujeros de 1 cm de diámetro con un espaciamiento entre sí de 1 cm.



**Figura 3.13** Esquema de la placa perforada.

Con las partes más importantes del modelo físico dimensionadas el siguiente paso será la construcción.



**Figura 3.14** Esquema final del modelo Hidráulico.

## CAPÍTULO IV

### 4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO

#### 4.1. Introducción

Para la construcción de las partes principales del modelo hidráulico se acudió a talleres con amplia experiencia; la selección de los materiales se realizó en base a la disponibilidad en el mercado, costo, durabilidad y fácil manejo.

Los materiales elegidos para las estructuras más importantes del modelo hidráulico son los metales por su resistencia, el acrílico por ser fácilmente moldeable y su transparencia, la madera por su resistencia con reducido peso.

A continuación se describe brevemente el proceso constructivo de las partes más importante del modelo.

#### 4.2. Estructuras Metálicas

##### 4.2.1. Mesa Soporte

En un lugar dedicado a la construcción de muebles metálicos se procedió a construir la mesa metálica, la cual es el soporte de todos los materiales y accesorios del modelo a desarrollar. Para tener una estructura rígida se utilizó tubo cuadrado de 1 pulgada.

Se uso pintura electroestática para tener un mejor acabado y adherencia al metal, evitando así la pronta corrosión.



**Fotografía 4.1** Construcción de la mesa metálica.

#### 4.2.2. Apoyos Laterales

Los apoyos laterales se construyeron utilizando ángulos metálicos de 2.5 centímetros de largo y ancho, un espesor de 3 milímetros, con un longitud de 1.40 metros, estos perfiles están sujetos al tablero mediante pernos tipo cabeza perdida.

Las platinas están construidas con el mismo material, tienen un ancho de 1 centímetro y un espesor de 3 milímetros, se encuentran sujetas a los apoyos laterales mediante prisioneros de 5 mm de diámetro.



**Fotografía 4.2** Perfiles metálicos.

### 4.3. Tableros

Como tablero se utilizó madera tipo “triplex” de 1 centímetro de espesor, se escogió esta madera por su peso mínimo, buena resistencia a humedad, ya que estará en contacto con agua. Además este tipo de madera es económica comparada con otro tipo de tableros existentes en el mercado.

Para tener un mejor acabado se procedió a colocar una lámina de “fórmica” en los tableros.

El tablero superior presenta dos perforaciones que serán de utilidad para que el agua abandone el canal e ingrese al sistema de recirculación.

Como ayuda de aprendizaje el modelo tendrá pendiente variable, por lo que se colocaron tres bisagras entre el extremo del tablero y la mesa soporte, las cuales permitirán desplazar el tablero en forma angular, en el otro extremo se instalaron dos varillas de acero, las mismas que al cambiar el ángulo de inclinación se traban mediante una platina restringiendo el movimiento.



**Fotografía 4.3** Construcción del tablero.

#### 4.4. Partes de Acrílico.

Estas son las partes más importantes del modelo, para poder observar los fenómenos hidráulicos que ocurren para lo cual el material debe ser transparente.

El acrílico es fácilmente moldeable cuando se lo somete al calor a más de no perder su color original con la exposición a la luz solar, no se utilizó vidrio por ser más frágil y peligroso si llegase a romperse, además moldear el vidrio es más complicado.

Para los canales se utilizó una sola pieza de acrílico transparente de 4 milímetros de espesor doblada en forma de U para evitar fugas, colocadas dos tapas laterales del mismo material

El acrílico por ser un material fácilmente manejable se pudo fabricar los vertederos con las medidas requeridas.

Todas las piezas están unidas mediante bicarbonato sódico, un compuesto químico que funde el material soldándolo al secarse.



**Fotografía 4.4** Acrílico.

#### 4.5. Sistema de tuberías y acoples

Se trabajó con tubería de PVC de 1 pulgada de diámetro para el sistema de bombeo, y una tubería de ½ pulgada para los sistemas de desagüe.

La tubería utilizada admite una presión de hasta 350 psi, no puede ser roscada para su unión por lo que debe ser únicamente pegada.

En las instalaciones se utilizaron los acoples mínimos necesarios para reducir en lo posible las pérdidas de carga por accesorios, se encuentran fijas al tablero con la utilización de ganchos tipo mariposa.

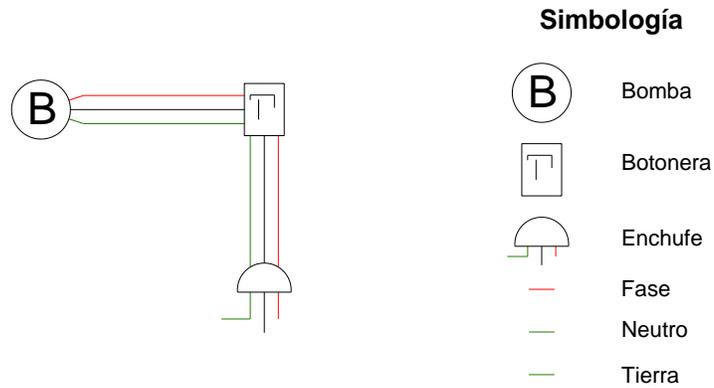


Fotografía 4.5 Unión de la tubería.

#### 4.6. Sistema Eléctrico

El sistema eléctrico funciona con un voltaje de 110. En la conexión se uso cable del tipo “3 x 12””. Para encender la bomba se colocó una botonera de simple encendido en la parte más visible de la mesa.

El cable se introdujo en la tubería de la mesa soporte para evitar contratiempos.



**Figura 4.1** Diagrama de la conexión eléctrica.



**Fotografía 4.6** Conexión de la botonera a la bomba.

#### 4.7. Tanque de almacenamiento

Se adquirió un tanque de almacenamiento plástico transparente para observar el nivel de agua, tiene una capacidad de 44 litros, fácilmente se lo encuentra en el mercado local. El material es además fácilmente manipulable ya que se deben realizar algunas perforaciones en la superficie y tapa para la colocación de los accesorios.

#### 4.8. Mangueras

Al ser el modelo de pendiente variable, se instaló una manguera de vinil transparente de 1 pulgada de diámetro, esta conecta la bomba como la tubería ubicada en el tablero, la misma manguera se utilizó para acoplar los desagües de los embalses en los canales con el tanque de almacenamiento.

En la unión del embudo receptor con el tanque se colocó una manguera flexible, provista de anillos internos de 2 pulgadas de diámetro, está sujeta a la tapa del tanque reservorio mediante un adaptador de tanque.



**Fotografía 4.7** Mangueras acopladas al modelo hidráulico.

#### 4.9. Sistema de Recirculación

La forma y pendiente escogida permite que el agua no se estanque y abandone con facilidad y rapidez el embudo.

El embudo está construido en metal, se encuentra pintado tanto exterior como interiormente, así se evita la corrosión temprana del material.

Se encuentra fijo al tablero mediante 5 tornillos ubicados en el borde del embudo.

Para evitar fugas de agua entre el tablero y el embudo, se colocó una capa de silicona.



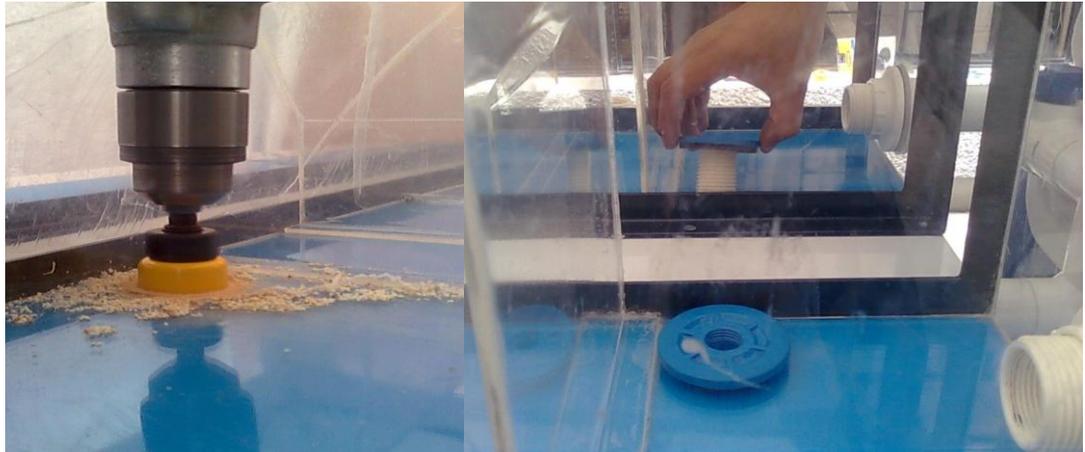
**Fotografía 4.8** Colocación del embudo en el tablero.

## **4.10. Desagües.**

### **4.10.1. Desagüe en el embalse.**

Al terminar las prácticas se necesitará retirar el agua del embalse por lo que se realizó una perforación en cada canal, conectándose una llave de  $\frac{1}{2}$  pulgada de P.V.C. mediante un adaptador de tanque, para permitir el paso del agua en el embalse hacia el tanque de almacenamiento.

Este sistema permitirá además controlar aún más el caudal de ingreso al vertedero ya que actúa como un “by pass”.



**Fotografía 4.9** Desagüe en los embalses.

#### **4.10.2. Desagüe en el tanque de almacenamiento.**

Al terminar las prácticas es aconsejable retirar en su totalidad el agua alojada en el tanque de almacenamiento, para lo cual se acopló al tanque una llave de  $\frac{1}{2}$  pulgada de P.V.C., la misma que está ubicada en la parte inferior del tablero la cual permite realizar esta labor de manera sencilla.



**Fotografía 4.10** Desagüe en el tanque reservorio.

#### 4.10.3. Placa agujereada

La placa agujereada y pequeñas piezas de acrílico se fabricaron en un centro de corte con láser.



**Fotografía 4.11** Corte láser de acrílico.

El agua proveniente de la bomba llega al embalse con mucha fuerza, por el escaso espacio no puede estabilizarse correctamente, provocando que el flujo sea inestable, dificultando las mediciones de altura sobre la cresta.



**Fotografía 4.12** Funcionamiento del vertedor sin placa perforada.

Con la colocación de la placa perforada el agua que llega de la bomba choca contra la parte de inferior de la placa que no tiene agujeros, obligando a pasar el líquido por los agujeros, apaciguando el caudal. Esta acción estabiliza el flujo, pudiendo así realizar mejores mediciones de alturas.



**Fotografía 4.13** Funcionamiento del vertedor con placa perforada.



**Fotografía 4.14** Modelo construido (vistas laterales).



**Fotografía 4.15** Modelo construido (vistas frontales).

#### 4.11. Análisis de Costos

**Tabla 4.1** Valores de costos en la construcción del modelo.

	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Mesa Soporte	1	85.00	85.00
Tablero	1	15.00	15.00
Lámina Fórmica	1	13.55	13.55
Cemento Contacto	2	0.95	1.90
Apoyos Laterales	4	7.50	30.00
Tanque Almacenamiento	1	15.77	15.77
Acrílico	1	250.00	250.00
Corte Láser Acrílico	1	11.20	11.20
Perfiles	4	7.50	30.00
Silicona	2	2.97	5.94
Embudo	1	20.00	20.00
Bomba 0.5HP 110V	1	60.00	60.00
Botonera 15 A	1	3.14	3.14
Tubo PVC Americano 1'	1	4.20	4.20
Codo PVC 1' 2 x 90	3	0.59	1.78
Tee PVC 1'	1	0.73	0.73
Adaptador de Tanque 1'	4	4.60	18.40
Adaptador de Tanque 1/2'	4	2.30	9.20
Válvula bola 1'	2	6.12	12.23
Válvula bola 1/2'	3	3.00	9.00
Unión PVCP 1'	2	0.36	0.72
Adap MM PVCP 1'	4	0.50	2.02
Teflón	2	0.40	0.80
Tubo/Vinil 1'	1	7.77	7.77
Manguera Flexible	1	8.65	8.65
Polilimpia 125 cc	2	2.31	4.61
Pega Tubo Kalipega 125 cc	1	2.22	2.22
Codo cachimba H.G. 1'	1	0.09	0.09
Neplo Adapt. Flex 1'	2	1.50	3.00
Abrazadera 1'	4	0.30	1.20
Abrazadera 2'	2	0.45	0.90
Cable 3 x 12	1	2.80	2.80
Enchufe Polarizado	1	0.70	0.70
		Total \$	632.52

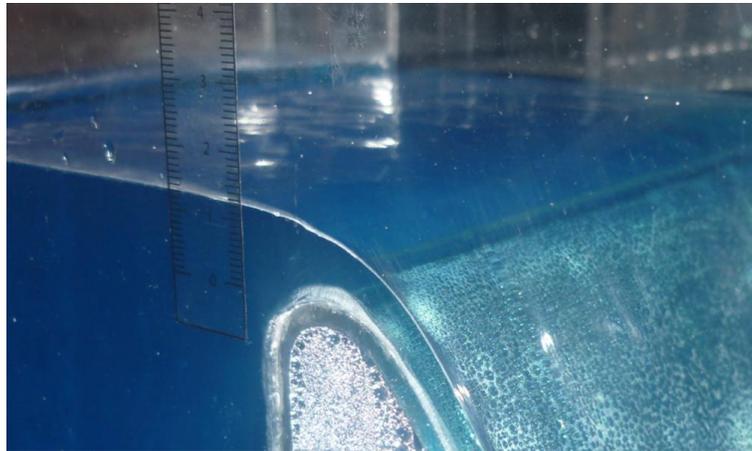
## CAPÍTULO V

### 5. CALIBRACION DEL MODELO Y REALIZACIÓN DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO

#### 5.1. Comprobación de las Fórmulas Teóricas en el Modelo

##### 5.1.1. Altura sobre el vertedero

El nivel de agua sobre la cresta del vertedero de demasías fue calculado en la sección 3.2.1 en 0.01313 m, la altura medida sobre la cresta es 1.3 cm.



**Fotografía 5.1** Comprobación de la altura sobre la cresta del vertedero.

##### 5.1.2. Velocidad de Salida ( $V_o$ )

Para un flujo permanente en un canal rectangular horizontal de ancho constante, utilizamos la Ecuación 5.1. (Ecuación de continuidad), encontrando la velocidad de salida del agua de la cresta del vertedero, teniendo como dato el caudal y el perímetro mojado.

$$Q=A_1.V_1=A_2.V_2$$

**Ecuación 5.1.**

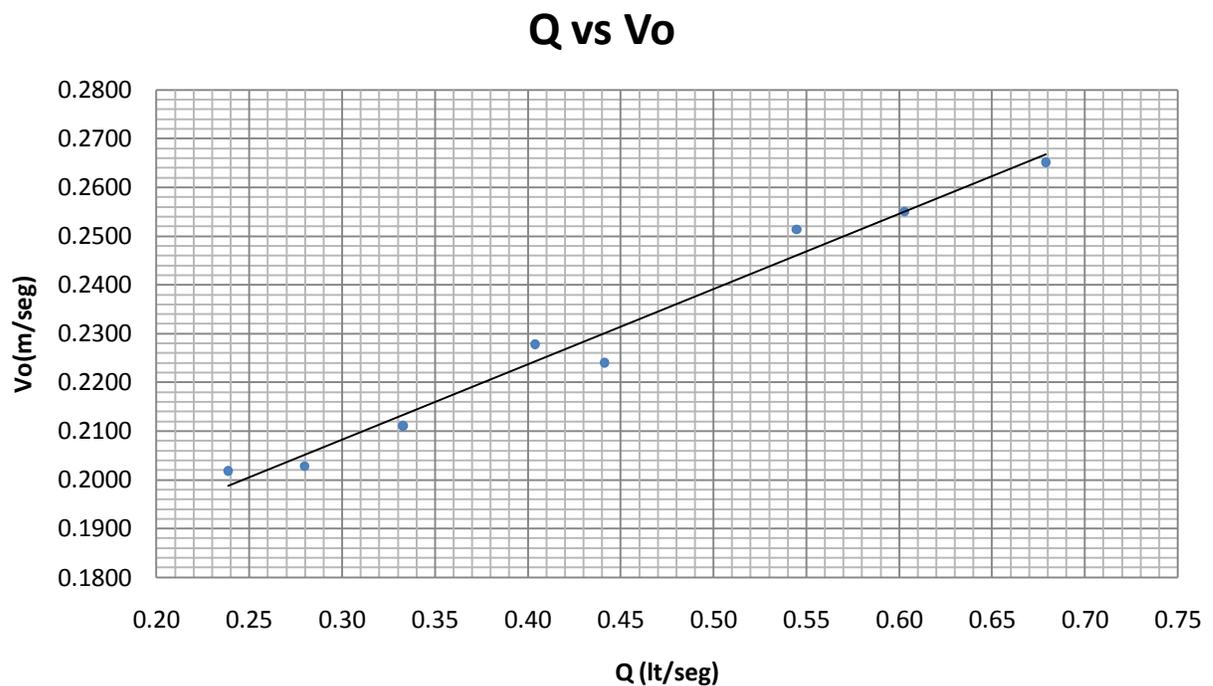
$$0.00067 \text{ m}^3/\text{seg} = (0.013 \text{ m} * 0.197 \text{ m}) * V$$

$$V = 0.2616 \text{ m/seg}$$

**Tabla 5.1** Valores de caudal y velocidad de salida.

Q (lt/seg)	ho (cm)	Vo (m/seg)
0.6791	1.30	0.2652
0.6029	1.20	0.2550
0.5447	1.10	0.2514
0.4413	1.00	0.2240
0.4040	0.90	0.2278
0.3327	0.80	0.2111
0.2797	0.70	0.2028
0.2386	0.60	0.2019

**Gráfico 5.1** Velocidad de salida según el caudal.



### 5.1.3. Velocidad de Llegada (V1)

De la misma manera se puede calcular la velocidad que llega el agua procedente del vertedero (velocidad de entrada al cauce).

$$Q=A.V$$

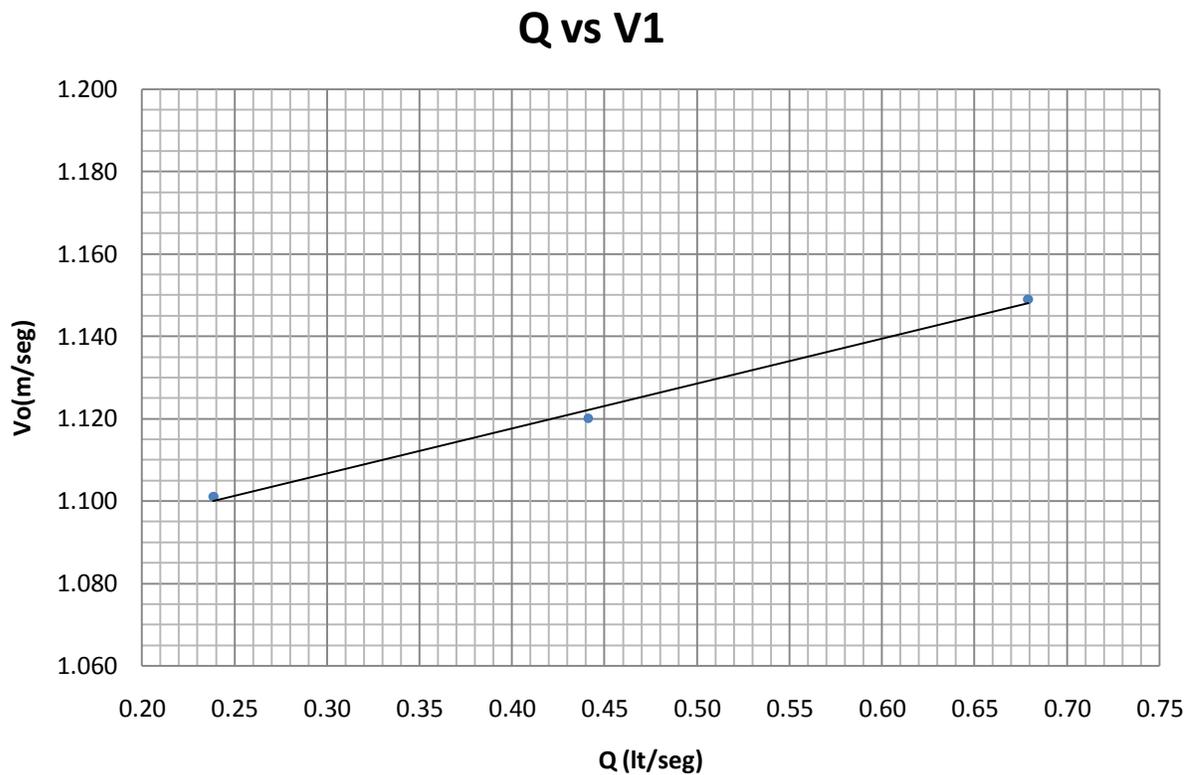
$$0.00067 \text{ m}^3/\text{seg} = (0.003 \text{ m} * 0.197 \text{ m}) * V$$

$$V = 1.1419 \text{ m/seg}$$

**Tabla 5.2** Valores de caudal y velocidad de salida.

Q (lt/seg)	h (m)	V1
0.6791	0.0030	1.149
0.4413	0.0020	1.120
0.2386	0.0011	1.101

**Gráfico 5.2** Velocidad de Llegada según el caudal.



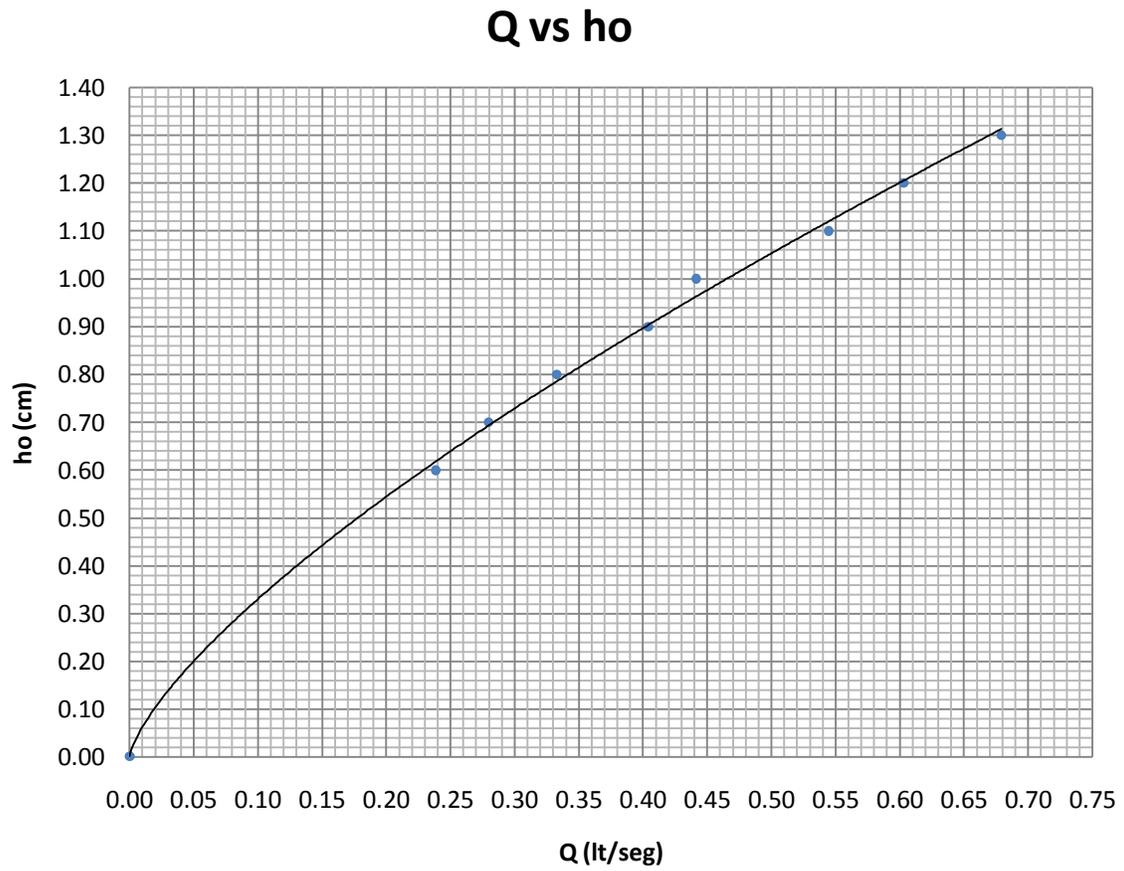
## 5.2. Curva de Descarga

Se define a la curva de descarga como la relación caudal altura, el cual permite encontrar fácilmente los diferentes calados y caudales correspondientes.

Mediante variaciones de caudales y tomando en cuenta la carga sobre el vertedero, se tiene:

**Tabla 5.3** Valores de Caudal y altura sobre la cresta.

Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo (seg)	Q (m <sup>3</sup> /seg)	Q (lt/seg)	ho (cm)
0.195	0.197	0.21	0.00807	11.88	0.000679	0.6791	1.30
0.195	0.197	0.21	0.00807	13.38	0.000603	0.6029	1.20
0.195	0.197	0.21	0.00807	14.81	0.000545	0.5447	1.10
0.195	0.197	0.21	0.00807	18.28	0.000441	0.4413	1.00
0.195	0.197	0.21	0.00807	19.97	0.000404	0.4040	0.90
0.195	0.197	0.21	0.00807	24.25	0.000333	0.3327	0.80
0.195	0.197	0.21	0.00807	28.84	0.000280	0.2797	0.70
0.195	0.197	0.21	0.00807	33.81	0.000239	0.2386	0.60

**Gráfico 5.3.** Curva de descarga para el modelo.

### **5.3. Ensayos Realizados**

#### **5.3.1. Práctica # 01: Disipador por resalto hidráulico**

##### **5.3.1.1. Objetivo**

- Estudiar, a través del experimento, el comportamiento de un resalto hidráulico como disipador de energía en un canal de pendiente variable
- Observar los diferentes tipos de resalto que se forman en la práctica, mediante el intercambio de obstáculos en el canal y la variación de caudal.
- Verificar la validez de las ecuaciones que describen el comportamiento del flujo.

##### **5.3.1.2. Marco teórico**

El resalto hidráulico es el ascenso brusco del nivel de agua que se presenta en un canal abierto a consecuencia de la desaceleración que sufre una corriente de agua que fluye a elevada velocidad y pasa a una zona de baja velocidad. En este fenómeno se verifica un cambio violento de régimen, de supercrítico a subcrítico, acompañado por una importante turbulencia así como también significativa disipación de energía.

Mediante la variación de las alturas de los obstáculos que generan la piscina de disipación, así como también variando los

caudales y las pendientes, se podrán tener una variedad de resultados.

#### **5.3.1.3. Equipo**

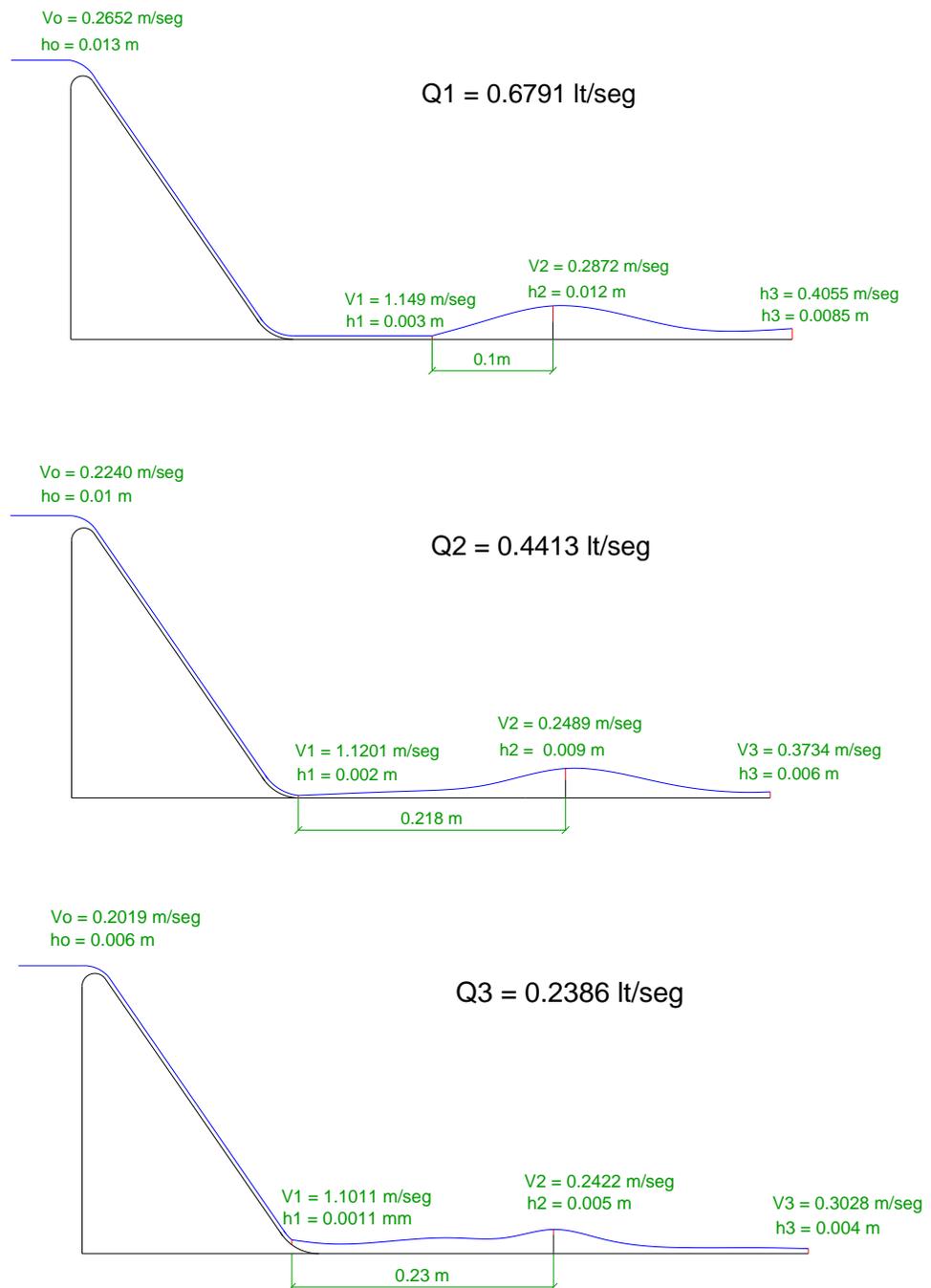
- Canal de pendiente variable con vertedero de demasías
- Flexómetro
- Obstáculos de diferentes alturas.

#### **5.3.1.4. Procedimiento**

- Cerrar la llave de desagüe del tanque de almacenamiento de agua.
- Llenar el tanque hasta el nivel mínimo.
- Verificar la pendiente del canal.
- Abrir la válvula del canal en el que desee trabajar.
- Encender la bomba alimentadora.
- Esperar hasta que el agua sobre la cresta se estabilice.
- Tomar las mediciones necesarias, intercambiando los obstáculos que producen el resalto hidráulico en el cauce.

#### **5.3.1.5. Resultados**

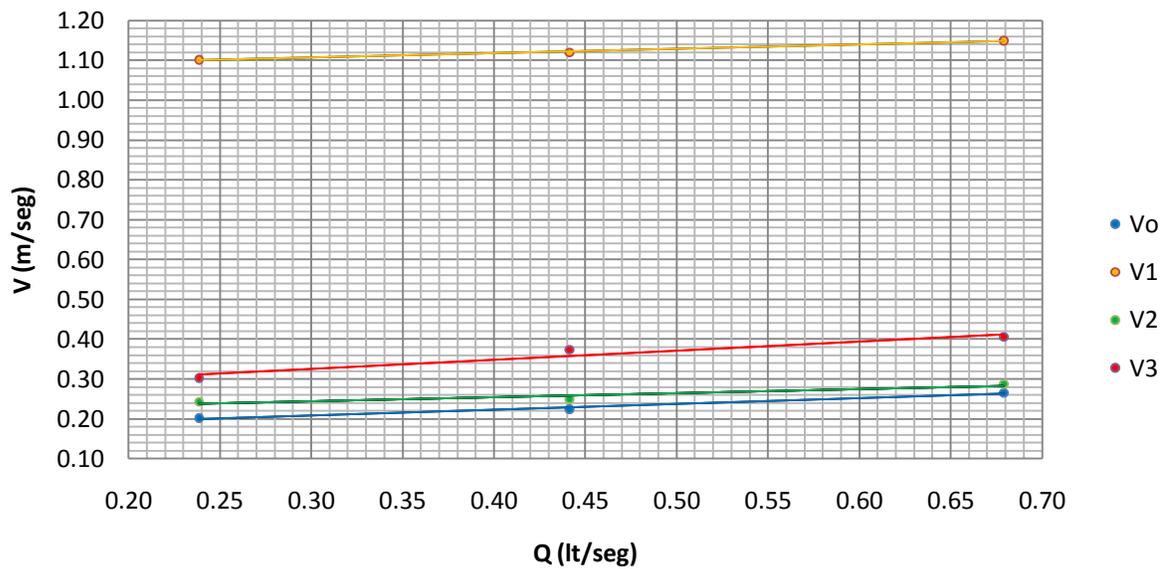
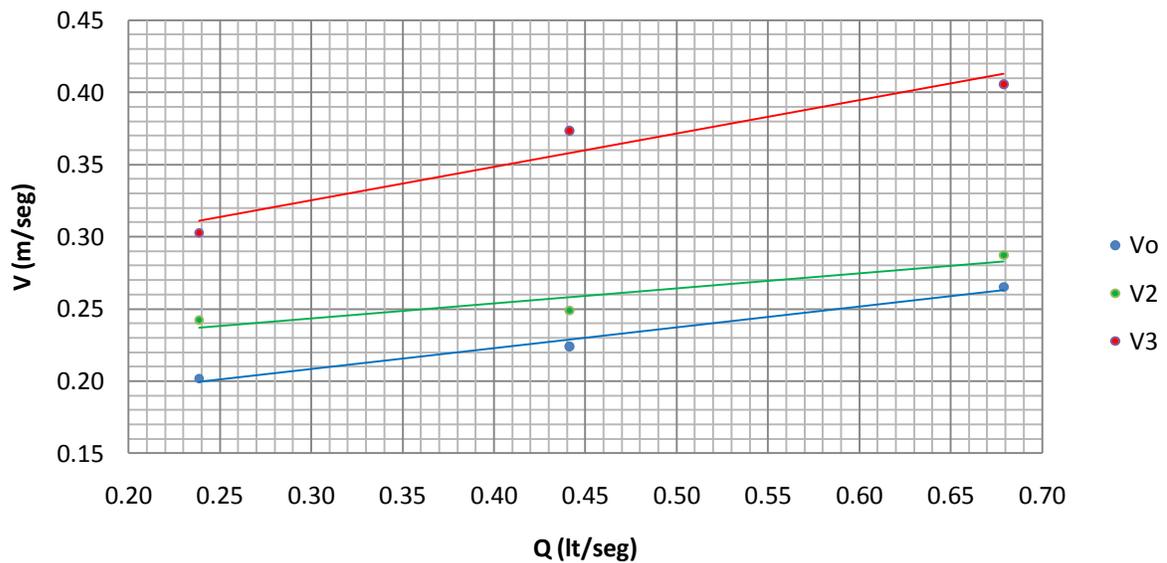
Para un obstáculo de 0.015 m, variando los caudales más representativos se tiene:



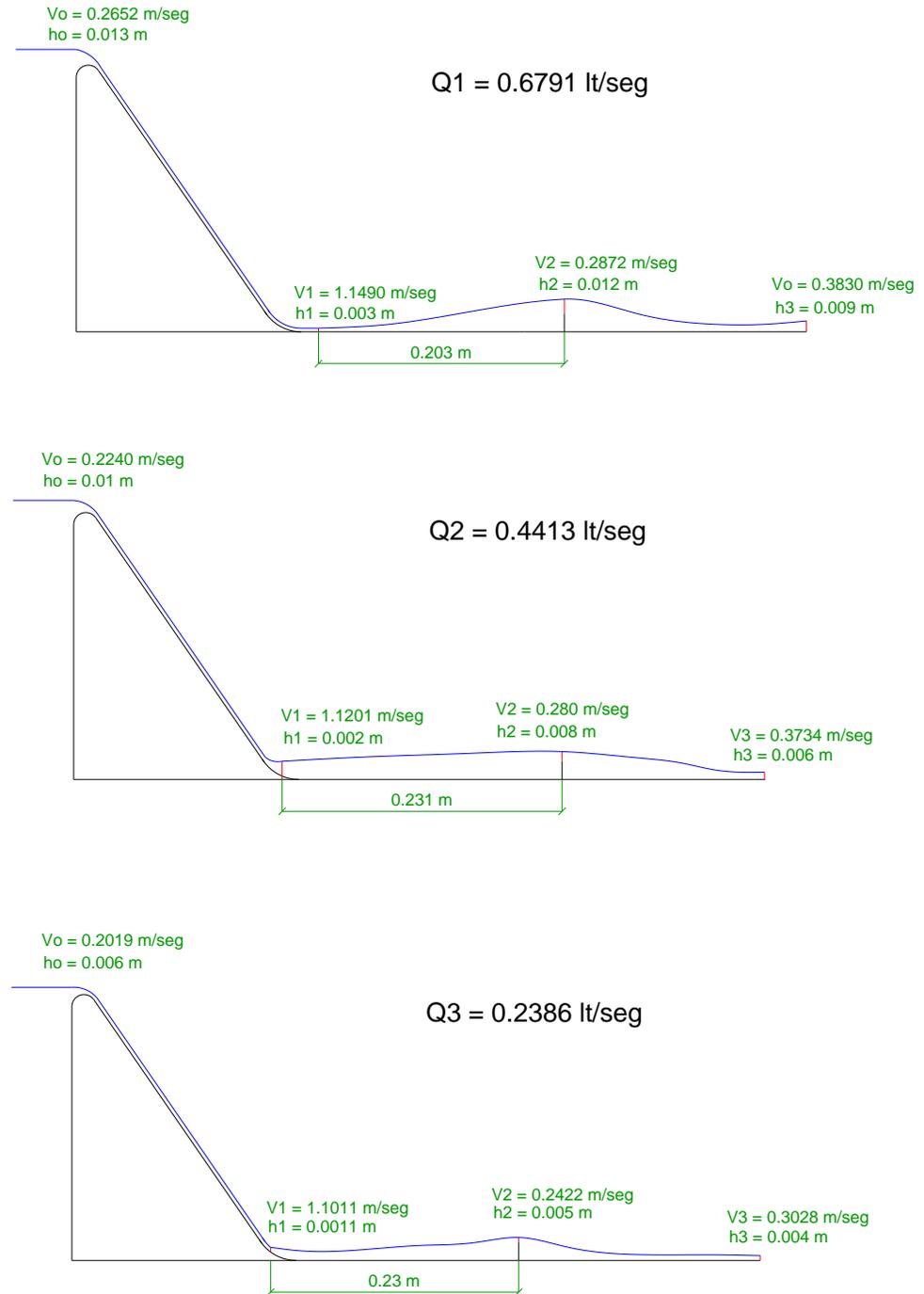
**Figura 5.1** Resultados de resalto hidráulico para un obstáculo de 0.015 cm de altura.

**Tabla 5.4** Valores de las velocidades para un obstáculo de 0.015 m de altura.

	Q (lt/seg)	Vo (m/seg)	V1 (m/seg)	V2 (m/seg)	V3 (m/seg)	% Disipación entre 1 y 3
Q1	0.6791	0.2652	1.1490	0.2872	0.4055	64.71
Q2	0.4413	0.2240	1.1201	0.2489	0.3734	66.67
Q3	0.2386	0.2019	1.1011	0.2422	0.3028	72.50

**Gráfico 5.4** Velocidades para un obstáculo de 0.015 m de altura.**Gráfico 5.5** Velocidades Vo, V2, V3, (obstáculo de 0.015 m).

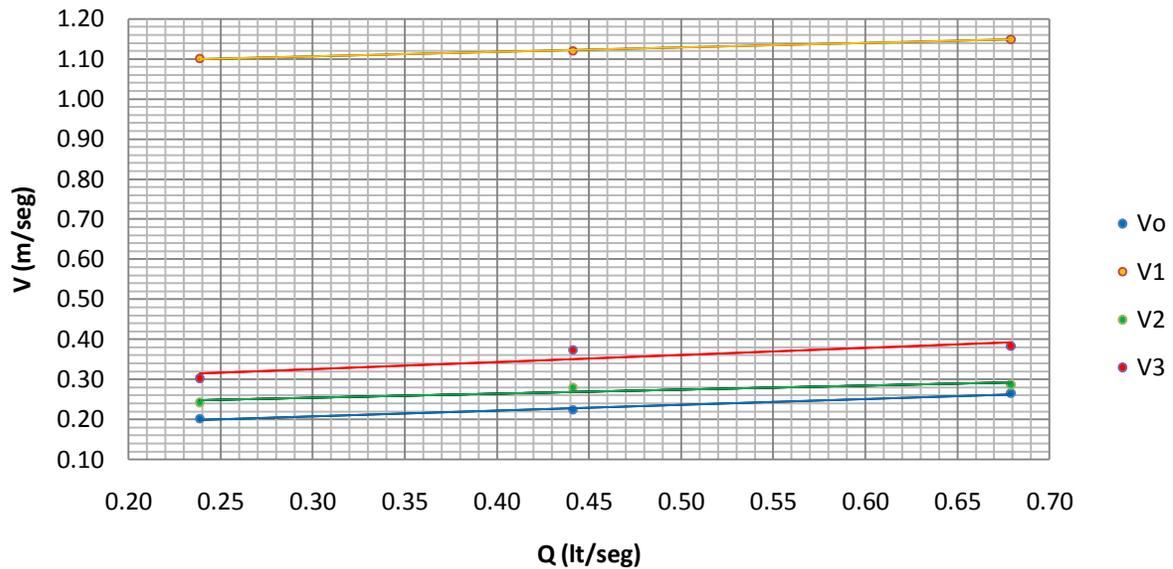
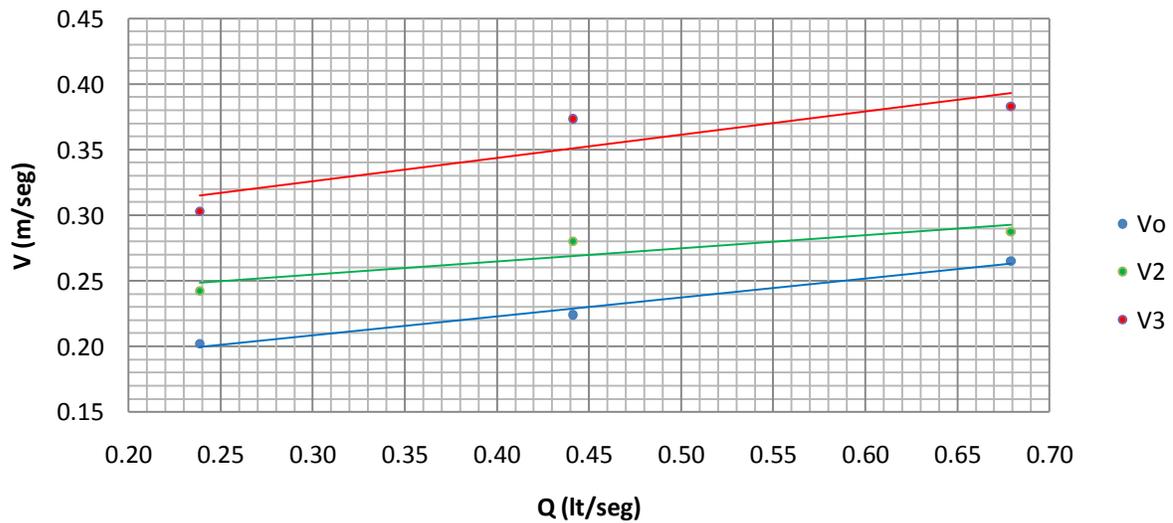
Para un obstáculo de 0.02 m, variando los caudales más representativos se tiene:



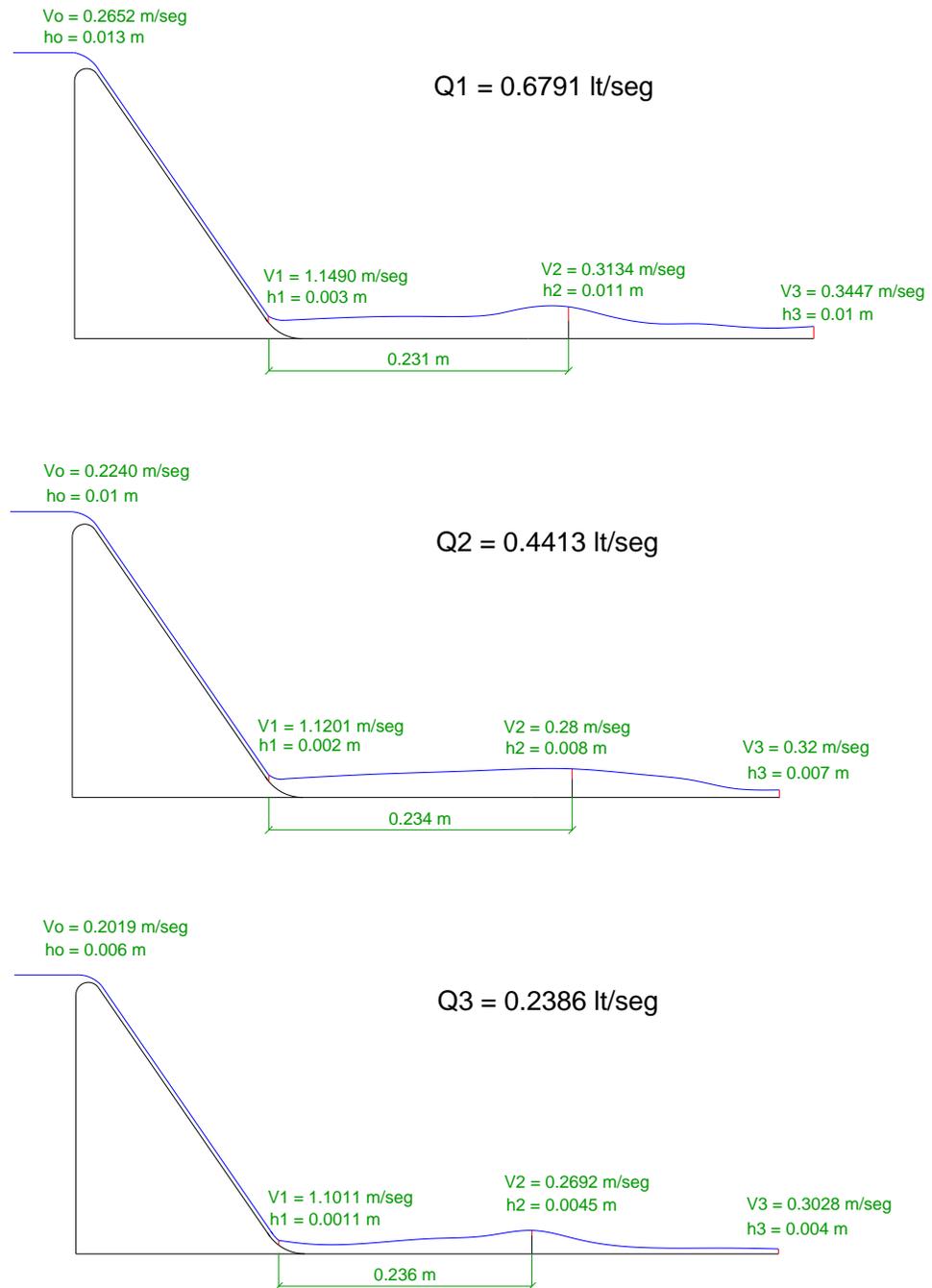
**Figura 5.2** Resultados de resalto hidráulico para un obstáculo de 0.02 cm de altura.

**Tabla 5.5** Valores de las velocidades para un obstáculo de 0.02 cm de altura.

	Q (lt/seg)	Vo (m/seg)	V1 (m/seg)	V2 (m/seg)	V3 (m/seg)	% Disipación entre 1 y 3
Q1	0.6791	0.2652	1.1490	0.2872	0.3830	66.67
Q2	0.4413	0.2240	1.1201	0.2800	0.3734	66.67
Q3	0.2386	0.2019	1.1011	0.2422	0.3028	72.50

**Gráfico 5.6** Velocidades para un obstáculo de 0.02 m de altura.**Gráfico 5.7** Velocidades Vo, V2, V3, (obstáculo de 0.02 m).

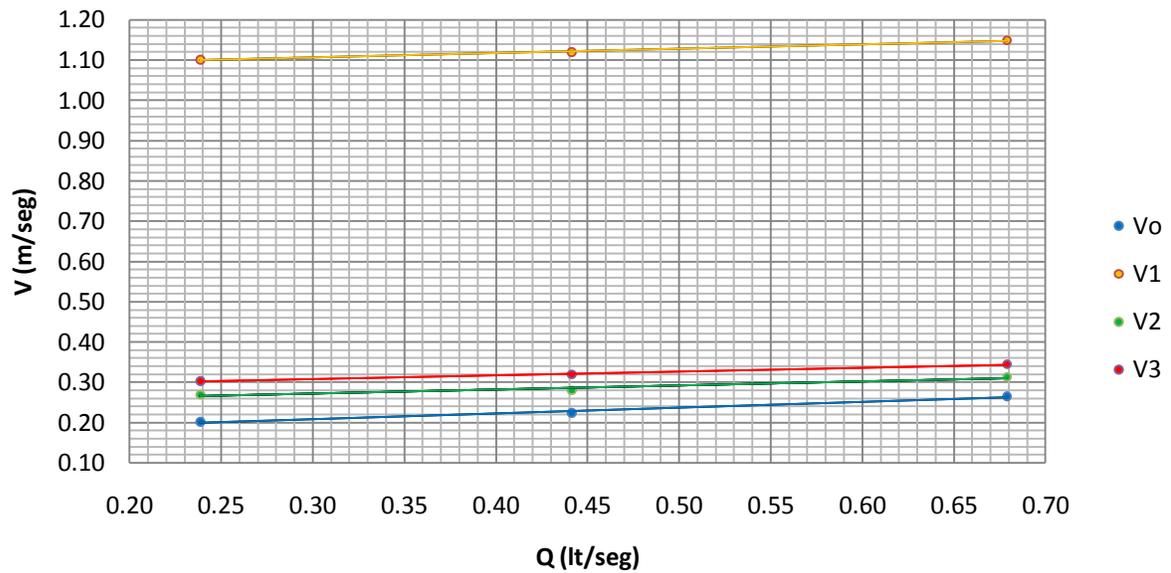
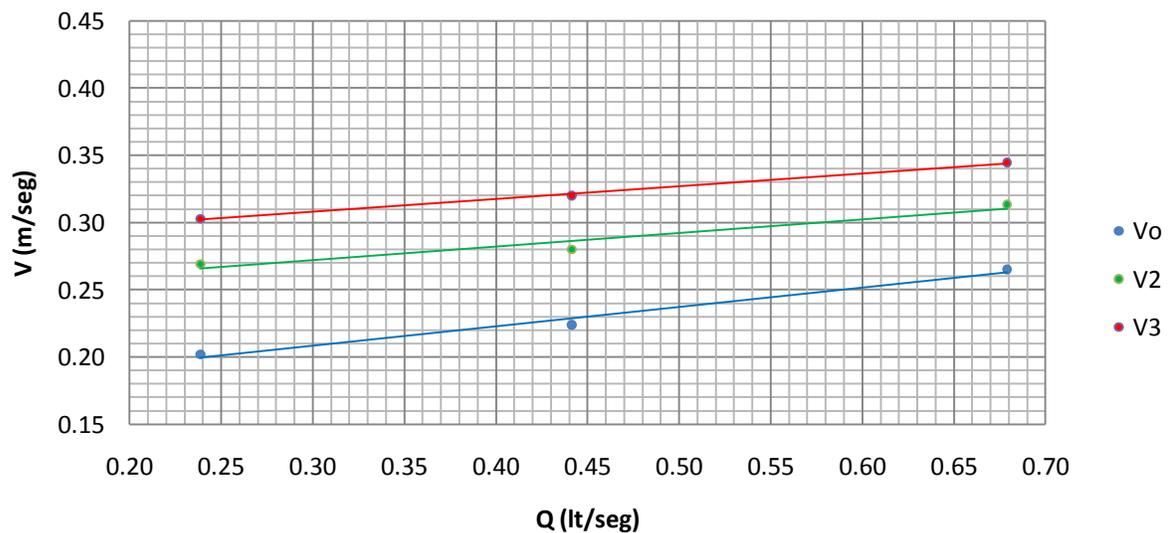
Para un obstáculo de 0.025 cm, variando los caudales más representativos se tiene:



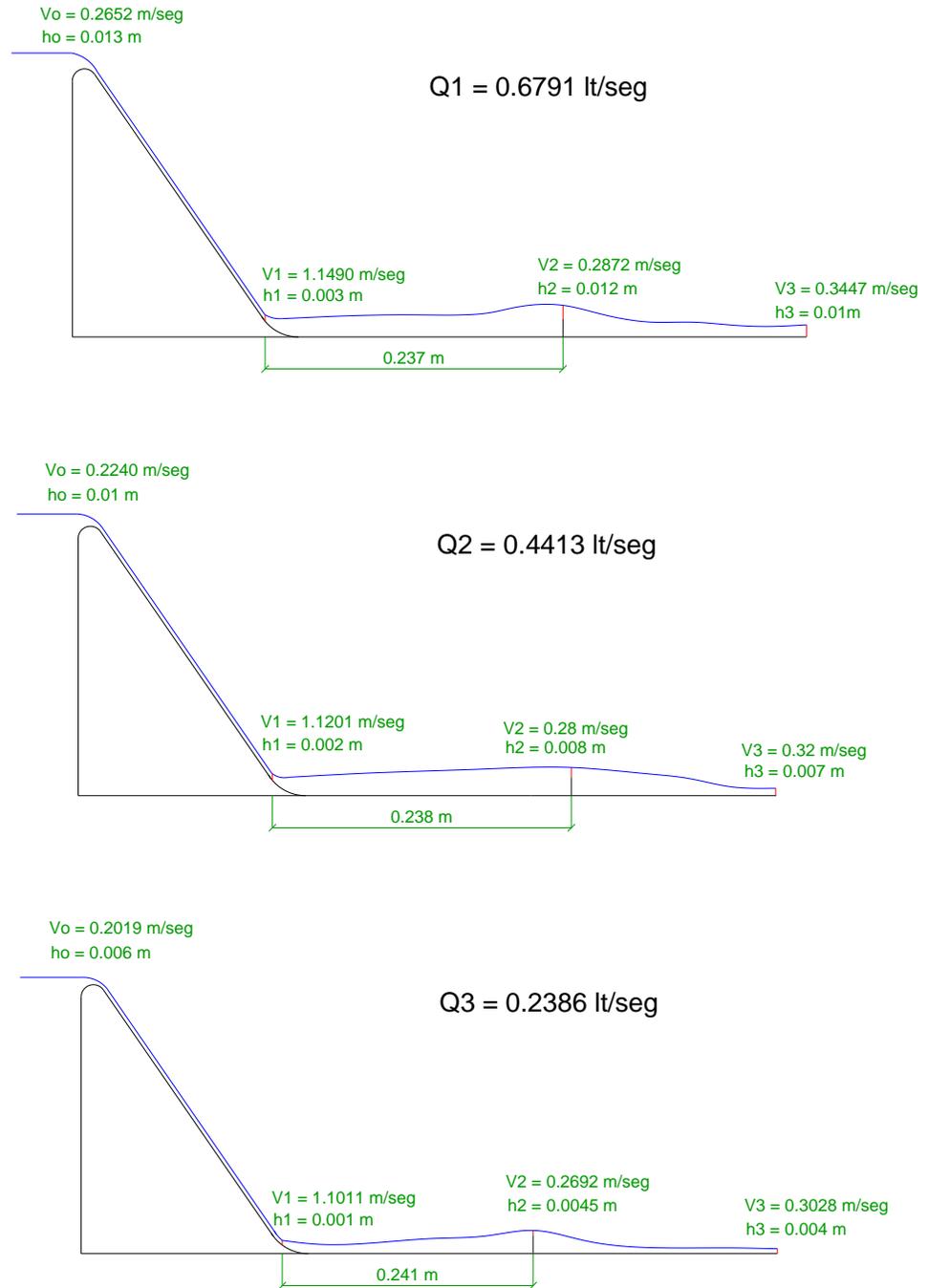
**Figura 5.3** Resultados de resalto hidráulico para un obstáculo de 0.025 cm de altura.

**Tabla 5.6** Valores de las velocidades para un obstáculo de 0.025 m de altura.

	Q (lt/seg)	Vo (m/seg)	V1 (m/seg)	V2 (m/seg)	V3 (m/seg)	% Disipación entre 1 y 3
Q1	0.6791	0.2652	1.1490	0.3134	0.3447	70.00
Q2	0.4413	0.2240	1.1201	0.2800	0.3200	71.43
Q3	0.2386	0.2019	1.1011	0.2692	0.3028	72.50

**Gráfico 5.8** Velocidades para un obstáculo de 0.025 m de altura.**Gráfico 5.9** Velocidades Vo, V2, V3, (obstáculo de 0.025 m).

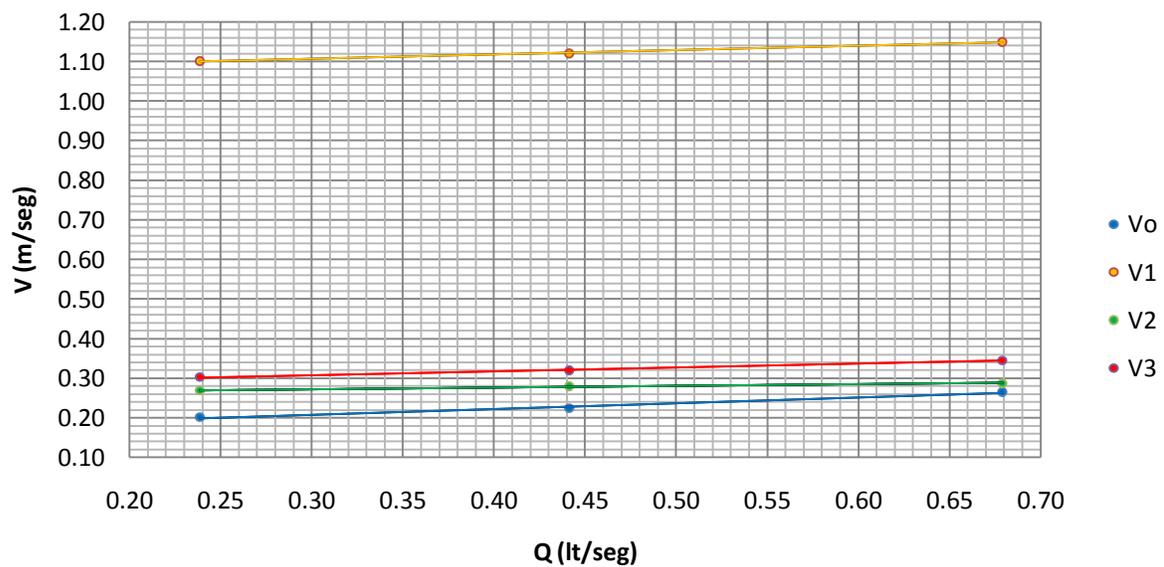
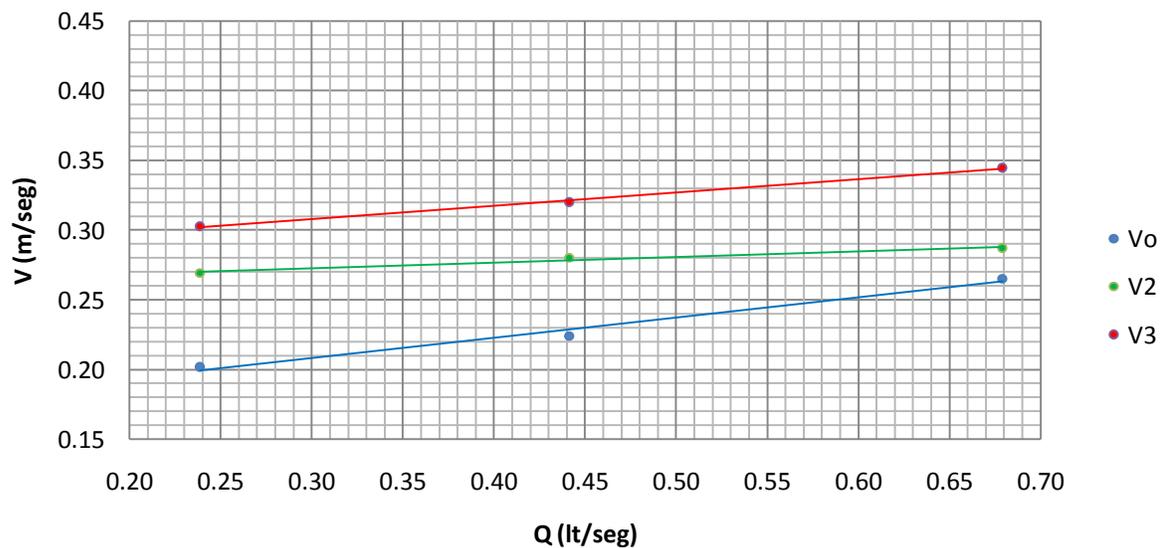
Para un obstáculo de 0.03 m, variando los caudales más representativos se tiene:



**Figura 5.4** Resultados de resalto hidráulico para un obstáculo de 0.03 m de altura.

**Tabla 5.7** Valores de velocidades para un obstáculo de 0.03 m de altura.

	Q (lt/seg)	Vo (m/seg)	V1 (m/seg)	V2 (m/seg)	V3 (m/seg)	% Disipación entre 1 y 3
Q1	0.6791	0.2652	1.1490	0.2872	0.3447	70.00
Q2	0.4413	0.2240	1.1201	0.2800	0.3200	71.43
Q3	0.2386	0.2019	1.1011	0.2692	0.3028	72.50

**Gráfico 5.10** Velocidades para un obstáculo de 0.03 m de altura.**Gráfico 5.11** Velocidades Vo, V2, V3, (obstáculo de 0.03 m).

Para una altura de obstáculo de 0.015 cm, utilizando el mayor caudal se desarrolla un resalto hidráulico desplazado.



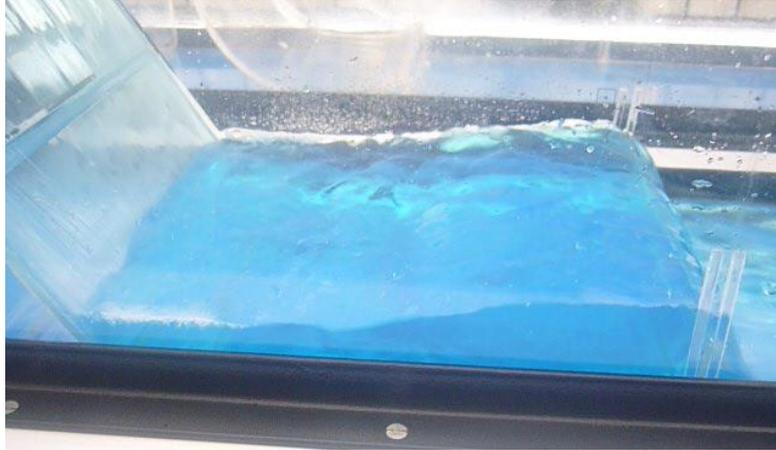
**Fotografía 5.2** Resalto hidráulico desplazado.

Para una altura de obstáculo de 0.02 m, utilizando el mayor caudal se desarrolla un resalto hidráulico normal (desarrollado a partir de la transición).



**Fotografía 5.3** Resalto hidráulico normal.

Para alturas de obstáculo mayores a 0.025 cm, utilizando el mayor caudal se desarrolla un resalto hidráulico sumergido o también llamado ahogado.



**Fotografía 5.4** Resalto hidráulico desplazado.

## **5.3.2. Práctica # 02: Disipador Esquí**

### **5.3.2.1. Objetivo**

- Estudiar, a través del experimento, el comportamiento de disipador de energía hidráulica tipo esquí en un canal de pendiente variable.
- Observar los cambios que se producen con la variación de caudal y pendiente.
- Verificar la validez de las ecuaciones que describen el comportamiento del flujo.

### **5.3.2.2. Marco teórico**

Cuando la descarga de los vertedores puede hacerse directamente sobre el río, el chorro se proyecta lejos de la estructura por medio de un deflector terminal o trampolín. El agua en estas estructuras sale como un chorro libre y cae en el cauce a una distancia del extremo del vertedor.

La trayectoria del chorro depende de la energía del flujo en el extremo y del ángulo con el que el chorro sale del trampolín.

### **5.3.2.3. Equipo**

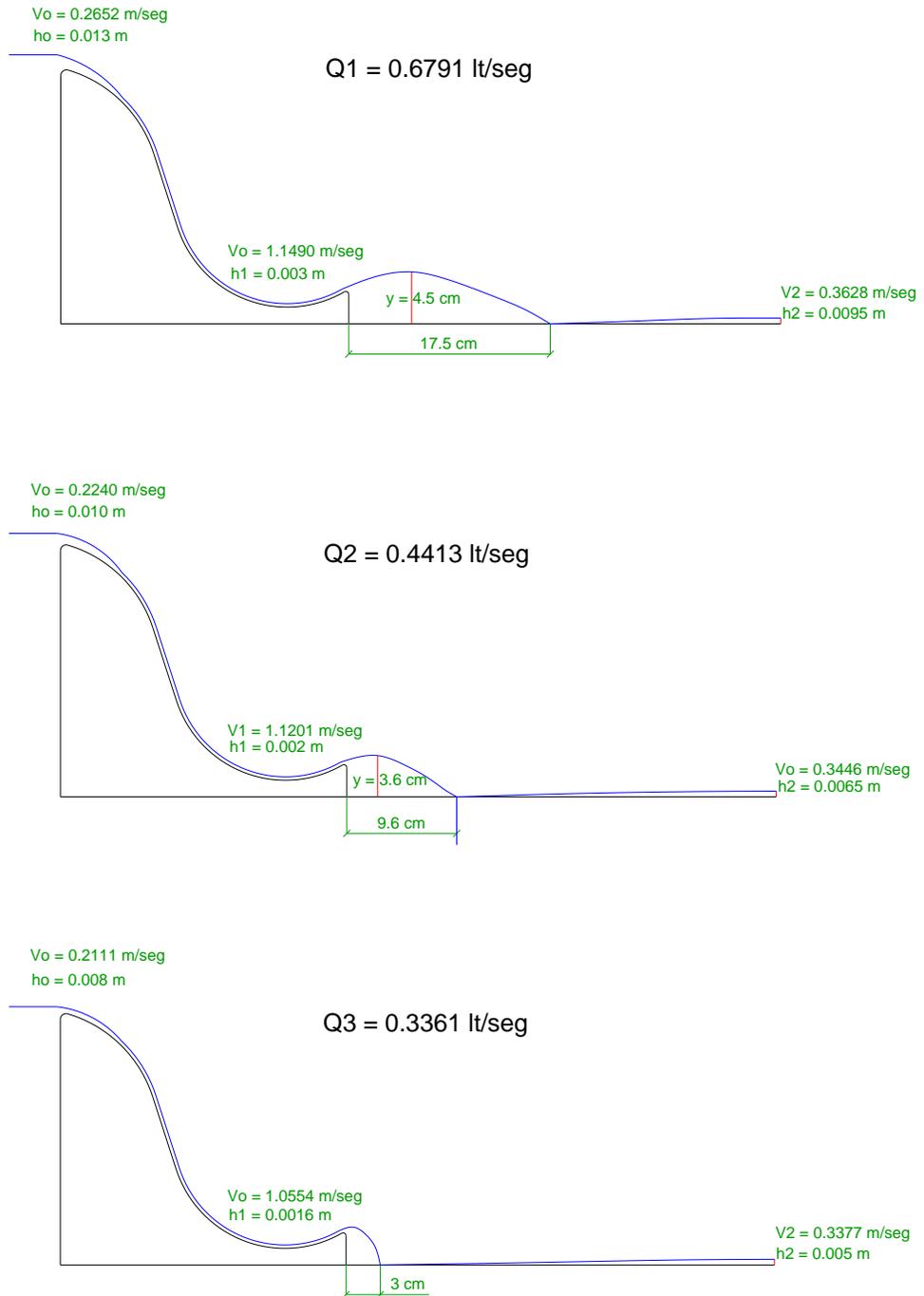
- Canal de pendiente variable con vertedero de demasías tipo esquí
- Flexómetro

#### **5.3.2.4. Procedimiento**

- Cerrar la llave de desagüe del tanque de almacenamiento de agua.
- Llenar el tanque hasta el nivel mínimo.
- Abrir la válvula del canal en el que desee trabajar.
- Encender la bomba alimentadora.
- Esperar hasta que el agua sobre la cresta se estabilice.
- Tomar las mediciones necesarias.

#### **5.3.2.5. Resultados**

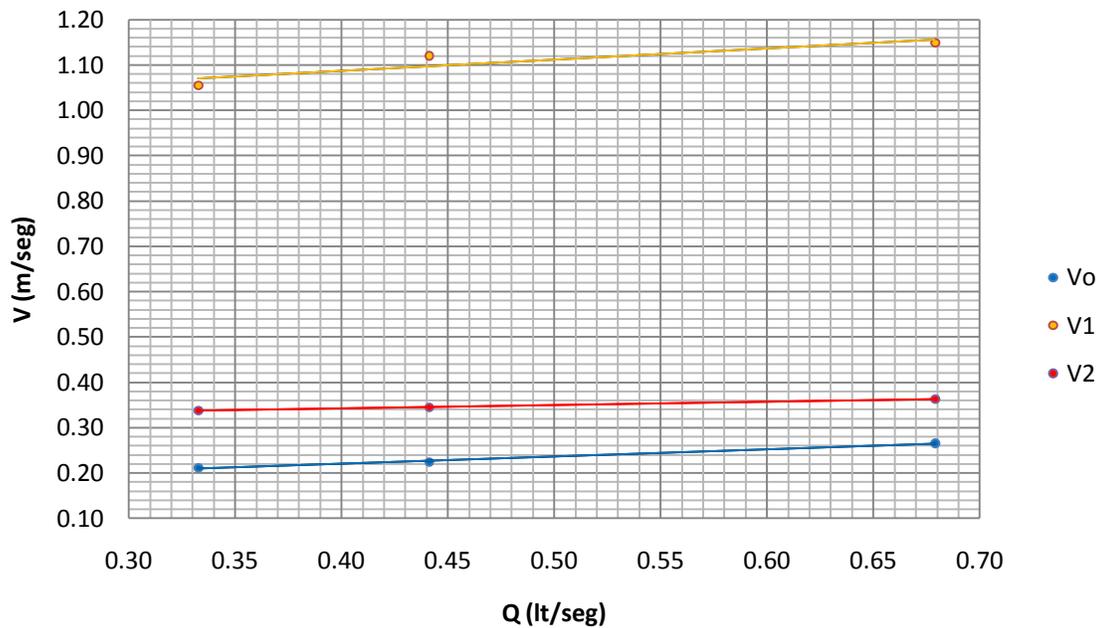
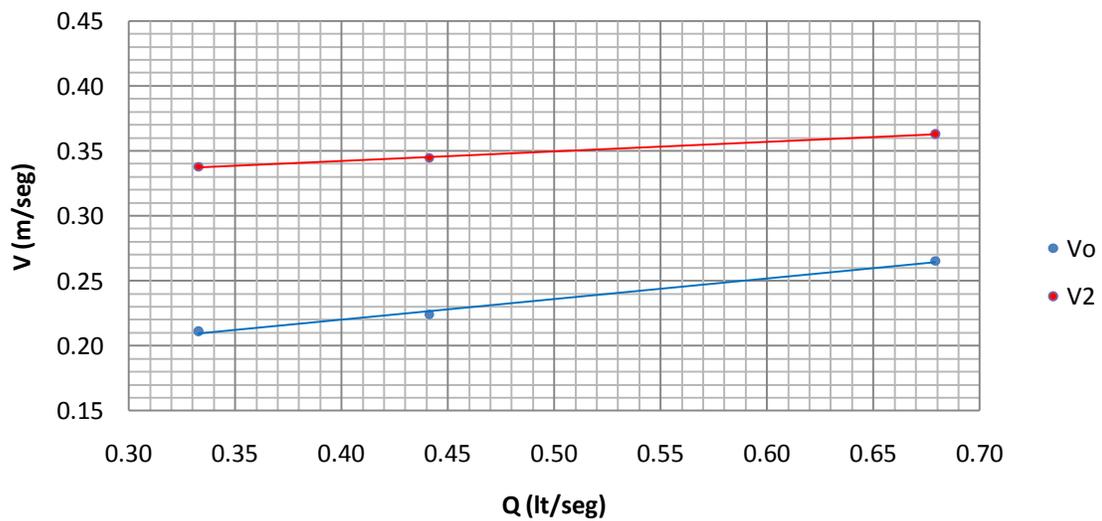
Utilizando el vertedero con deflector y variando los caudales más representativos se tiene:

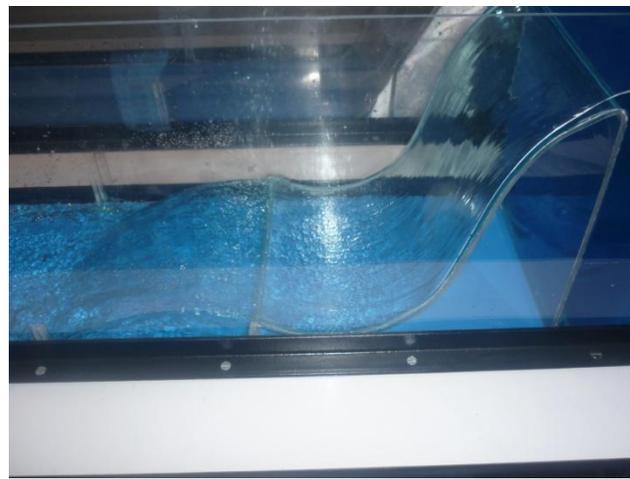


**Figura 5.5** Resultados para el dissipador tipo esquí.

**Tabla 5.8** Valores de velocidades para el dissipador tipo esquí.

	Q (lt/seg)	Vo (m/seg)	V1 (m/seg)	V2 (m/seg)	% Disipación entre 1 y 2
Q1	0.6791	0.2652	1.1490	0.3628	68.42
Q2	0.4413	0.2240	1.1201	0.3446	69.23
Q3	0.3327	0.2111	1.0554	0.3377	68.00

**Gráfico 5.12** Velocidades para el dissipador esquí.**Gráfico 5.13** Velocidades Vo, V2 para el dissipador esquí.



**Fotografía 5.5** Funcionamiento del dissipador tipo esquí.

### **5.3.3. Práctica # 03: Disipador esquí sumergido.**

#### **5.3.3.1. Objetivo**

- Estudiar, a través del experimento, el comportamiento de disipador de energía hidráulica tipo esquí sumergido en un canal de pendiente variable.
- Observar los cambios que se producen con la variación de caudal y pendiente.
- Verificar la validez de las ecuaciones que describen el comportamiento del flujo.

#### **5.3.3.2. Marco teórico**

El funcionamiento hidráulico de este tipo de disipador se manifiesta por la formación del resalto hidráulico en la superficie del esquí.

El uso de los disipadores esquí sumergido puede ser perjudicial debido al desgaste que produce en las superficies de concreto, causado por el material que regresa a lo largo del borde del deflector debido al remolino en el fondo.

#### **5.3.3.3. Equipo**

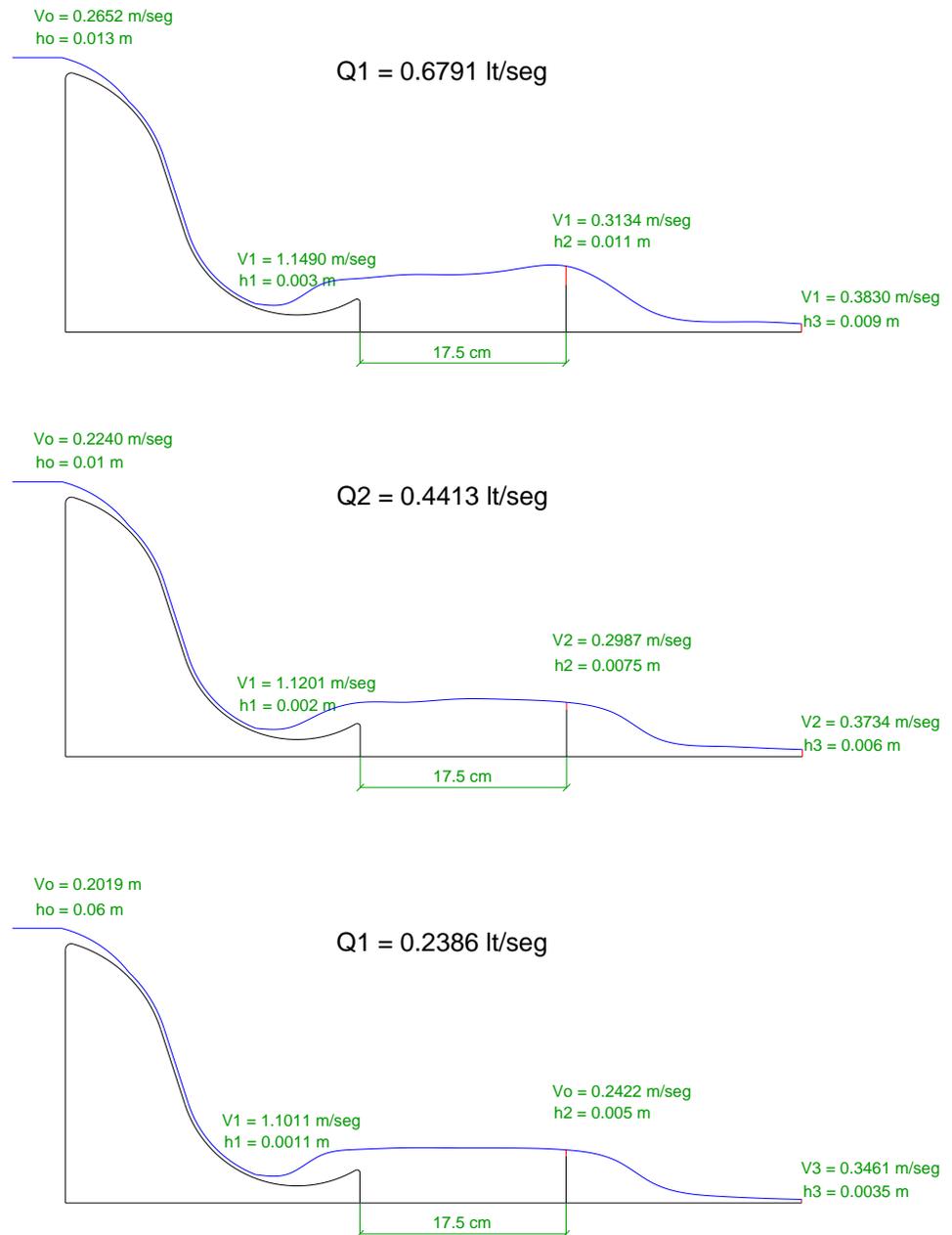
- Canal de pendiente variable con vertedero de demasías tipo esquí.
- Flexómetro

#### **5.3.3.4. Procedimiento**

- Cerrar la llave de desagüe del tanque de almacenamiento de agua.
- Llenar el tanque hasta el nivel mínimo.
- Abrir la válvula del canal en el que desee trabajar.
- Encender la bomba alimentadora.
- Esperar hasta que el agua sobre la cresta se estabilice.
- Tomar las mediciones necesarias.

#### **5.3.3.5. Resultados**

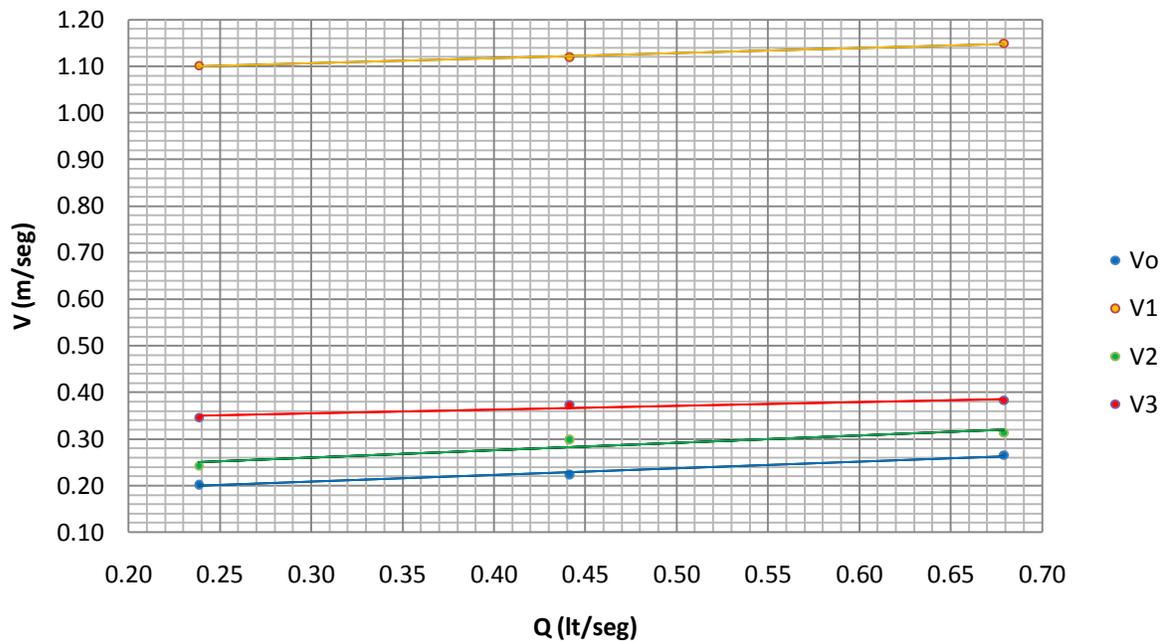
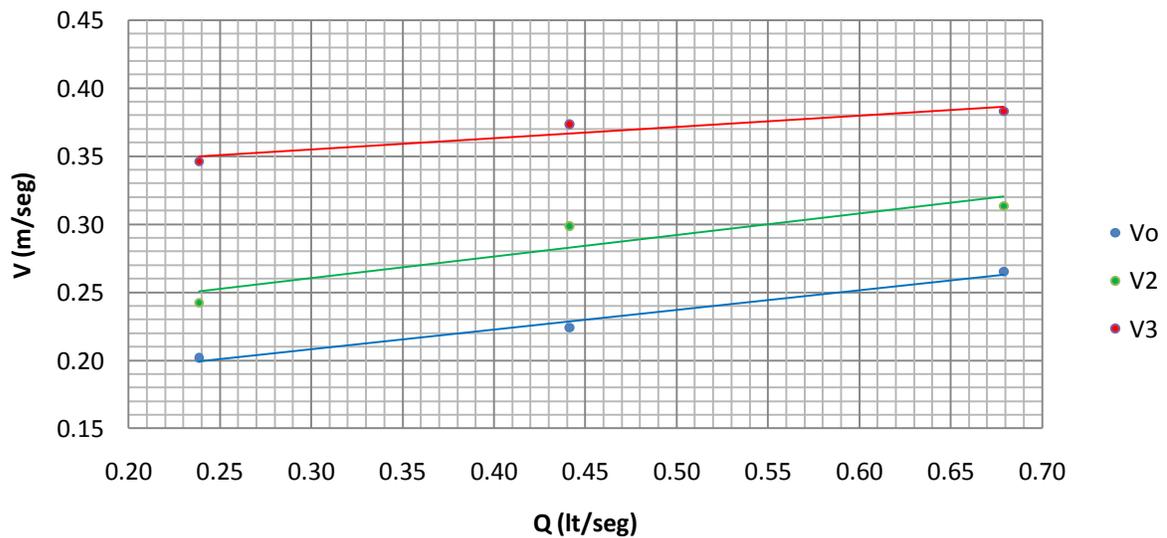
Utilizando el vertedero con deflector, colocado un obstáculo de 0.04 m a 17.5 cm de separación, variando los caudales más representativos se tiene:

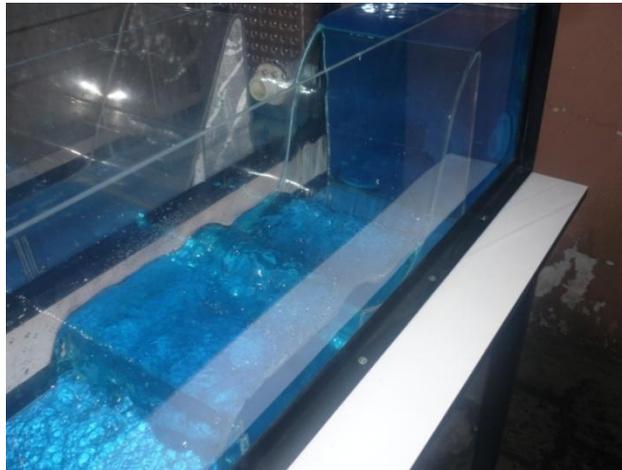


**Figura 5.6** Resultados para el dissipador tipo esquí sumergido.

**Tabla 5.9** Valores de velocidades para el dissipador tipo esquí sumergido.

	Q (lt/seg)	Vo (m/seg)	V1 (m/seg)	V2 (m/seg)	V3 (m/seg)	% Disipación entre 1 y 3
Q1	0.6791	0.2652	1.1490	0.3134	0.3830	66.667
Q2	0.4413	0.2240	1.1201	0.2987	0.3734	66.667
Q3	0.2386	0.2019	1.1011	0.2422	0.3461	68.571

**Gráfico 5.14** Velocidades para el dissipador tipo esquí sumergido**Gráfico 5.15** Velocidades Vo, V2, V3, para el dissipador esquí sumergido.



**Fotografía 5.6** Funcionamiento del dissipador tipo esquí sumergido.

## 6. CONCLUSIONES

- Un modelo físico no resuelve todos los problemas que se presentan en el diseño hidráulico de una estructura, por las similitudes adoptadas ya que no todas pueden ser escogidas, surgiendo las limitaciones que todo modelo tiene.
- La correcta interpretación de los resultados obtenidos en el modelo, ayudará a resolver problemas futuros, ya que una de las finalidades de este proyecto es la que los estudiantes tengan una mejor visión de las obras hidráulicas.
- Con el modelo hidráulico de disipadores de energía se puede observar claramente los fenómenos que ocurren, cumpliendo el objetivo de ser una ayuda de aprendizaje en el área hidráulica.
- Se comprueba que las distintas fórmulas para calcular la longitud del resalto hidráulico sirven para cuando no se tenga una pendiente considerable, pero al variar la pendiente estas fórmulas no cumplen su objetivo.
- No se pueden tener mediciones exactas por la falta de instrumentos adecuados para dicha tarea.

## 7. RECOMENDACIONES

- Fomentar la investigación en todos los campos, especialmente en el área de hidráulica.
- No trabajar el modelo bajo el nivel mínimo de agua ni encender el modelo sin abrir las llaves, ya que la bomba puede sufrir daños mecánicos.
- Construir otros tipos de modelos hidráulicos, logrando un laboratorio más completo, enriqueciendo el conocimiento de los estudiantes.
- Adquirir todos los instrumentos y maquinaria necesaria para el laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería civil.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Rocha, A. Los modelos como herramienta para el diseño hidráulico.
- Canizalez Casillas, R. Apuntes sobre teoría de modelos de obras hidráulicas a superficie libre. Universidad de Sonora, México.
- Chanson, H. Hidráulica del flujo en canales abiertos. Mc Graw Hill.
- Ven te Chow, Hidráulica de canales abiertos. Mc Graw.
- French, R H, Hidráulica de Canales Abiertos. Mc Graw Hill.
- U.S.B.R. (Bureau of Reclamation), USA. Diseño de Presas Pequeñas.
- Muson Young Okiishi. Fundamentos de Mecánica de Fluido. Editorial Limusa.
- Novak, P; Moffat, AIB; Nalluri, C. Estructuras Hidráulicas. 2 Ed. Mc Graw Hill.
- Torres Herrera. Obras Hidráulicas. Editorial Limusa.
- Linsley, Ray K; Franzini, Joseph B. Ingeniería de los recursos hidráulicos. Editorial Continental
- Argüello, Washington. Estudio experimental sobre el chorro de salida y la eficiencia del cuenco amortiguador al pie de un salto en esquí y su aplicación al proyecto Misbaque. Tesis de Grado. E.P.N.

- Anda, G. Construcción y prácticas de laboratorio de un canal abierto de pendiente fija. Tesis de grado, E.P.N.
  - Fuel, H. Estudio experimental de flujo en rápidas. Tesis de grado, E.P.N.
  - Rodríguez, HA. Hidráulica experimental. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.
  - <http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/articulopagppal.html>
  - <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/obrashidraul/Cap4.html>
  - <http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/articulopagppal.html>
  - <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/06086/hec14ch07.cfm>
- m

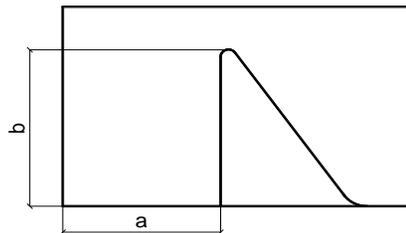
## **9. ANEXOS**

### **A. Formatos para realizar las Prácticas**

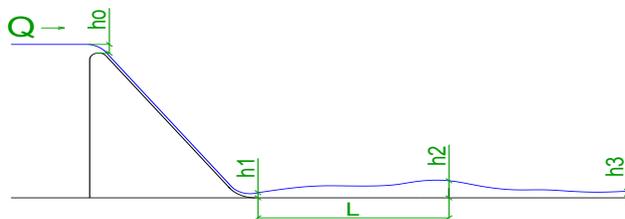
**ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO**  
Práctica Resalto Hidráulico

Integrantes: .....  
.....  
.....

Grupo: .....



Volúmen (m3)			Tiempo (seg)	Q (V/t)
a	b	ancho		



h0 (m)	h1 (m)	h2 (m)	h3 (m)	L (m)

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

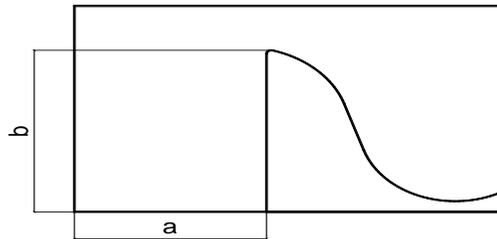
Vo (m/seg)	V1 (m/seg)	V2 (m/seg)	V3 (m/seg)

% de Disipación entre los puntos 1 y 3

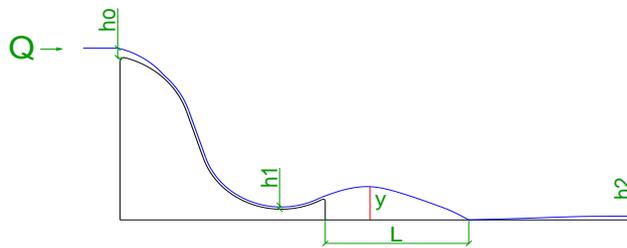

**ESCUELA POITECNICA DEL EJÉRCITO**  
Práctica Salto Esquí

Integrantes: .....  
.....

Grupo: .....



Volúmen (m3)			Tiempo (seg)	Q (V/t)
a	b	ancho		



h0 (m)	h1 (m)	h2 (m)	Y (m)	L (m)

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

Vo (m/seg)	V1 (m/seg)	V2 (m/seg)

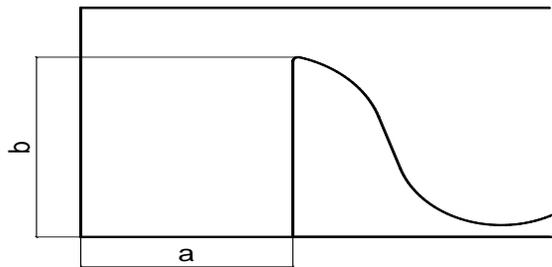
% de Disipación entre los puntos 1 y 2


**ESCUELA POITECNICA DEL EJÉRCITO**

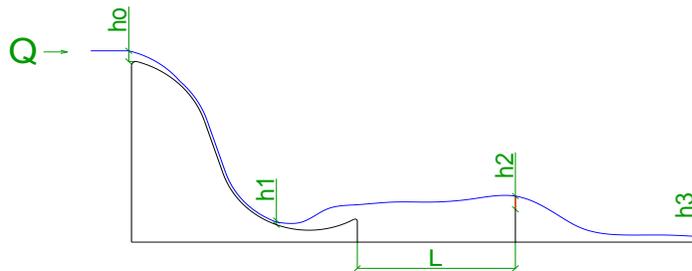
Práctica Salto Esquí

Integrantes: .....  
 .....

Grupo: .....



Volúmen (m3)			Tiempo (seg)	Q (V/t)
a	b	ancho		



h0 (m)	h1 (m)	h2 (m)	h3 (m)	L (m)

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

Vo (m/seg)	V1 (m/seg)	V2 (m/seg)	V3 (m/seg)

% de Disipación entre los puntos 1 y 3


**HOJA DE LEGALIZACION DE FIRMAS**

**ELABORADO POR**

---

Freddy Ortiz Ortiz

**DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

---

Ing. Jorge Zúñiga Gallegos

**DIRECTOR DE LA UNIDAD DE ADMISION Y REGISTRO**

---

Ab. Laura López

Sangolquí, 23 de AGOSTO de 2010