

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**Modelamiento Hidráulico de Disipadores de Energía para su
Implantación en los Laboratorios
de la Universidad San Francisco de Quito**

Juan Francisco Capelo Jaramillo

Tesis de grado como requisito para la
obtención del título de ingeniero civil

Quito, 26 de Agosto 2009

AGRADECIMIENTO

A mis padres y mi hermana que han sido un apoyo incondicional en todos los momentos importantes de mi vida, sin los cuales no me habría sido posible el llegar donde ahora me encuentro. A mis abuelitos por haberme impartido su sabiduría y haberme guiado siempre por el camino correcto. A mis amigos, por haberme brindado su apoyo y comprensión en todos los momentos de mi vida. A los ingenieros Araque, Arellano, Jaramillo Núñez y Romo por haberme brindado sus valiosos conocimientos mientras fui su alumno.

Juan Francisco

DEDICATORIA

A mis padres, Ruperto y Marcela quienes siempre han confiado en mí y me han enseñado el camino correcto a seguir. A mi abuelito, mi hermana y mis tías quienes siempre han sido una ayuda y un apoyo.

ABSTRACT

The hydraulic modeling is based on mathematical and analogical models as the same as on kinematics, dynamics and geometrical similarities, becomes a powerful learning tool. In order to analyze the multiple hydraulic phenomena, there were found some tools like:

- Froude Number: it is used to classify fluxes in open channels. $Fr < 1$: Subcritical Flux(slow), $Fr = 1$: Critical Flux and $Fr > 1$: Supercritical Flux(fast).
- Reynolds Number: it is used to classify the fluxes in two groups: turbulent ($R > 2100$) and steady ($R < 2100$).
- Control and measurement instruments, just like pitostatic tubes.
- Drilled acrylic screens.
- Formulas presented by the U.S. Bureau of Reclamation.
- Hydraulic rebound analysis: as a consequence suffered by the flowing water, which has a high rate in an open channel, there appears a dramatic rise on the water level.

These tools were the core fundamentals used to solve and verify the experiments in the laboratory.

RESUMEN

El modelamiento hidráulico, basado tanto en modelos matemáticos y analógicos como en similitudes cinemáticas, dinámicas y geométricas, se convierte en una herramienta de uso tanto didáctico como práctico. Las múltiples herramientas que se usaron como base en el estudio de fenómenos producidos:

- El número de Froude, utilizado para clasificar el flujo en un canal abierto, yendo con una clasificación de $Fr < 1$: Flujo subcrítico (lento), $Fr = 1$: Flujo crítico y $Fr > 1$: Flujo supercrítico (rápido).
- El número de Reynolds, usado para clasificar a los flujos de turbulentos o laminares: laminar ($R < 2100$), turbulento ($R > 2100$).
- Instrumentos de medición y control, como los tubos pitostáticos y la manera de su correcto empleo.
- Pantallas de acrílico con perforaciones.
- Fórmulas Propuestas por el U.S. Bureau of Reclamation Para el Diseño de Vertederos
- Análisis del Resalto Hidráulico: Como consecuencia del retardo sufrido por la corriente de agua que fluye a gran velocidad en un canal abierto, se presenta un ascenso brusco del nivel de agua.

Fueron fundamentales para la resolución y comprobación de fenómenos observados en los diferentes disipadores de energía, lo cual era el objetivo final del modelo.

INDICE

CAPITULO I.	1
FUNDAMENTOS TEORICOS DEL MODELAMIENTO HIDRÁULICO.....	1
1.1. Historia del Modelaje.....	1
1.2 Clases de modelos.....	2
1.2.1 Modelos Matemáticos.....	2
1.2.2 Modelos Análogos.....	2
1.2.3 Modelos Físicos Reducidos.....	3
1.3 Similitud o Semejanza.....	5
1.3.1 Similitud Geométrica.....	5
1.3.2 Similitud Cinemática.....	6
1.3.3 Similitud Dinámica.....	7
1.4 Criterios de Similitud.....	9
1.4.1 Numero de Froude (Fr).....	9
1.4.2 Número de Reynolds (Re).....	10
CAPITULO II.....	11
ESCALA INFLUYENTE Y PARÁ METROS.....	11
2.1 Definición.....	11

2.2	Selección de escala.....	11
2.3	Determinación de escala según espacio y caudal.....	12
2.4	Coeficientes de escalamiento.....	13
2.5	Traslación de Resultados Obtenidos en el Modelo al Prototipo.....	13
CAPITULO III.....		14
DISEÑO MATEMÁTICO.....		14
3.1	Calculo de Caudal mediante el uso del modelo.....	14
3.1.2	Velocidad de Aproximación.....	15
3.1.3	Calculo de la Altura de Velocidad.....	16
3.1.4	Geometría de la Cresta.....	16
3.1.5	Perfil de la Napa Superior del Flujo en Vertederos.....	20
3.2	Calculo del Cuenco Disipador.....	21
3.3	Medidas del Prototipo.....	23
3.3.1	Medidas en el modelo.....	23
3.3.2	Medidas del prototipo.....	24
CAPITULO IV.....		25
CONSTRUCCION DEL MODELO FISICO.....		25
4.1	Bases para el diseño.....	25

4.2	Materiales a usarse en el Modelo.....	25
4.2.1	Acrílico.....	27
4.3	Construcción del Modelo.....	28
4.4	Instrumentos de Medición y Control.....	40
4.4.1	Instrumentos usados en la medición.....	40
4.4.1.1	Tubo Pitot.....	41
4.4.2	Instrumentos usados en el control.....	43
4.4.2.1	Pantallas de Acrílico con perforaciones.....	43
4.4.3	Calibración de Instrumentos.....	45
4.4.3.1	Corrección por capilaridad en tubo Pitot.....	45
4.4.3.2	Calibración del Tubo Pitot.....	49
4.4.4	Tanque para almacenar el agua de Recirculación.....	51
4.5	Instalaciones Auxiliares.....	52
4.6	Detalle Constructivo.....	52
4.6.1	Detalle de la Estructura Metálica Exterior.....	52
4.6.2	Detalle de la Estructura Metálica Interior.....	57
4.6.3	Detalle de las Paredes de Acrílico.....	59
4.6.4	Detalle de los Vertederos de Pared Gruesa.....	62
4.6.4.1	Detalle de Vertedero Tipo USBR Tipo II.....	62
4.6.4.2	Detalle de Vertedero con dissipador tipo Esquí.....	63

4.6.5	Detalle del Modelo Completo.....	63
4.7	Análisis de Costos.....	64
CAPITULO V.....		65
FUNDAMENTOS TEORICOS DE DISIPADORES.....		65
5.1	Fórmulas Propuestas por el U.S. Bureau of Reclamation Para el Diseño de Vertederos.....	65
5.2	Análisis del Resalto Hidráulico.....	66
5.3	Tipos de Cuencos de Disipación.....	69
5.3.1	Cuenco Disipador Bureau of Reclamation II.....	69
5.3.2	Vertedero en salto de Esquí.....	73
5.4	Comprobación de las fórmulas Teóricas en el Modelo.....	75
5.4.1	Altura de Diseño (Hd).....	75
5.4.2	Velocidad de Aproximación (Va).....	76
5.4.3	Velocidad de Salida en el Vertedero (V_1).....	77
5.4.4	Número de Froude (F_1).....	78
CAPÍTULO VI.....		79
REALIZACION DE LAS PRACTICAS DE LABORATORIO.....		79
6.1	Instrucciones para la utilización del modelo.....	79
6.2	Desarrollo de las prácticas.....	82
6.2.1	Practica #1.- Vertedero en Salto de Sky simple.....	82
6.2.2	Practica #2.- Vertedero en Salto de Sky sumergido.....	82

6.2.3	Practica #3.- Cuenco Disipador Bureau of Reclamation.....	82
6.3	Ensayos realizados.....	90
6.3.1	Practica #1.....	90
6.3.2	Practica #2.....	93
6.3.3	Practica #3.....	95
CAPITULO VII.....		98
7	Conclusiones y Recomendaciones.....	98

INTRODUCCION

Al realizar la investigación de un modelamiento hidráulico se busca reproducir de la manera mas completa las condiciones con las que se encuentra un prototipo en la naturaleza.

Al no poder emular todas las condiciones del complejo mundo natural, el camino restante es el de la simplificación, es así que esta investigación trata de reproducir un fragmento o aspecto de cada fenómeno que se presenta en la realidad y tratar de obtener en aquella porción la mayor semejanza posible al problema real para los fines prácticos buscados. Al llevar consigo, los ríos, agua, sólidos suspendidos, sólidos de fondo, cuerpos varios aparte de agentes químicos, se vuelve casi una tarea imposible el imitar dicho suceso en un modelamiento, razón por la cual se opta por la simplificación.

La hidráulica posee la ventaja de poder representar físicamente a escala la mayoría de sus modelos. La Teoría de Modelos es la disciplina desarrollada con el fin de

representar estos fenómenos. Dicha teoría utiliza el principio de similitud o semejanza que consiste en la aceptación de las conclusiones, obtenidas del análisis de un fenómeno en un modelo, y su aplicabilidad en la realidad. Por ejemplo, del modelamiento de un salto hidráulico se pueden obtener conclusiones aplicables al salto hidráulico producido en la naturaleza. Al ocurrir esto se puede decir que entre los dos fenómenos hay similitud o semejanza. Cabe recalcar que un modelo hidráulico no es una maqueta y que la aplicación de un criterio de similitud es lo que permite obtener resultados que puedan ser extrapolados al prototipo.

Se debe tomar en cuenta la importancia de la estructura que se está estudiando. Al

I

poseer dos variables tan importantes como costos elevados y gran complejidad en una estructura es necesario el pensar en la simplificación de un modelo hidráulico, ya que una falla en el prototipo acarrearía grandes pérdidas, tanto en dinero como en tiempo y quizás en vidas humanas. Si la estructura estudiada fuese pequeña, de fácil reparación y cuya destrucción o colapso no generase consecuencias mayores podría no ser necesario su modelamiento para su estudio.

Por otro lado, cuando la teoría que se requiere para el diseño está incompleta, es inaplicable o simplemente no existe, se tiene que incurrir en la investigación basada en modelos hidráulicos.

Una tercera razón para realizar una investigación en un modelo es el hecho de elevar el grado de seguridad de una estructura hidráulica. Cuando se realiza este estudio se posee la gran ventaja de la visualización del comportamiento de la estructura en tres dimensiones y en ocasiones prever problemas no examinados en el proceso de diseño.

Si se compara entre el costo de uso del modelo con el costo total de la obra se puede descubrir un ahorro probable y alternativamente la seguridad obtenida no es comparable.

Como una razón adicional el modelo permite el estudio de diversas condiciones de diseño y de operación. Permite la variación de caudales, tipos de disipadores y otras características del escurrimiento con gran facilidad; así como realizar los estudios y análisis de varias alternativas de diseño.

Cuando se ejecuta el diseño de una obra hidráulica, la primera versión es una guía ofrecida por el ingeniero especialista. Mas tarde al realizar la investigación en modelo

II

se puede obtener una segunda versión, la cual recoge cualquier cambio necesario en base a lo observado en el modelo. Se pueden mejorar continuamente los procesos de operación con base a la experiencia y la observación de la estructura.

En base al mejoramiento continuo se puede disminuir márgenes y coeficientes de seguridad innecesarios o excesivos, lo que a su vez conlleva en disminución de costos de la obra.

Las razones antes mencionadas son independientes entre sí y cualquiera de ellas podría justificar la realización de una investigación basada en modelamientos hidráulicos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Generar un modelamiento hidráulico físico, en laboratorio, de disipadores de energía, en donde los estudiantes de ingeniería civil de la Universidad San Francisco De Quito puedan analizar y estudiar la disipación de energía mediante practicas en el modelo.

OBJETIVOS ESPECIFICOS DEL PROYECTO:

- Presentación de modelos hidráulicos investigados que serán utilizados.
- III
- Diseño de un vertedero apropiado para el estudio de dispersión.
 - Diseño de los disipadores de energía.
 - Determinar la relación existente entre la perdida de energía y las dimensiones y características de los disipadores de energía.
 - Validar los resultados obtenidos.
 - Determinar la eficiencia de cada tipo de disipador de energía.

- Mejoramiento de la comprensión de la teoría hidráulica expuesta en clase, mediante la elaboración de manuales de procedimientos para el uso de disipadores de energía.
- Descripción de la construcción del modelo hidráulico físico.
- Elaboración de formatos para prácticas de laboratorio.

El trabajo presentara una comparación entre los diferentes tipos de disipadores de energía, realizando un análisis de los parámetros que influyen en el diseño,

IV

construcción y operación del modelo.

METODOLOGIA

Se utilizara el siguiente proceso para la investigación:

- Uso de los conocimientos adquiridos en los cursos relacionados con los temas a desarrollar.
- Estudio de bibliografía especializada en el diseño de azudes y disipadores de energía.

- Reconocimiento y aplicabilidad de la bibliografía al diseño y construcción del modelo hidráulico.
- Búsqueda y análisis de lecturas y documentación afín, en internet.
- Estudio de lecturas de normativas y especificaciones referentes al tema.
- Realización del vertedero y disipadores de acuerdo a solicitudes.

V

- Realización de diseños a una escala apropiada según limitaciones de áreas a disposición.
- Calibración del modelo y validación de datos.
- Resultados finales del estudio.
- Conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEORICOS DEL MODELAJE HIDRAULICO

1.1 Historia del Modelaje

La palabra hidráulica tiene por significado conducción de agua; y su origen proviene del griego *hydro* que significa agua y de *aulos* que significa conducción. La hidráulica consiste en el estudio del comportamiento del agua y de otros líquidos, pudiendo estar los mismos en reposo o en movimiento.

Desde tiempos muy antiguos el hombre ha tratado de controlar la mayoría de fenómenos que se presentan en la naturaleza, siendo algunos de estos causados por el agua. Es decir, se ha tratado de controlar y aprender a utilizar este recurso. Es por este motivo que todas las civilizaciones de antaño se desarrollaban en las proximidades de cuencas hidrográficas, siendo la agricultura la base de su economía.

Se tienen antecedentes de los tiempos de los egipcios y fenicios, quienes ya enfrentaban el problema del manejo del agua como base para el desarrollo de sus puertos y flotas para el comercio. Se tienen registros, que tanto en China, India, Pakistán, como en Mesopotamia se inicio el desarrollo de sistemas agrícolas para riego, así como desarrollo de sistemas contra inundaciones. A lo largo de la historia se puede encontrar que desde el 500 A.C. en la Grecia antigua, se construyeron acueductos y se comenzaron a desarrollar formulas y modelos matemáticos para dichos sistemas. En el siglo XVI se comenzaron a desarrollar los principios de la hidráulica con los científicos Keppler y Torricelli,

para más tarde darles paso a Newton, Bernoulli y Euler, en los 1800, quienes perfeccionaron estas teorías.

El primer modelo físico del cual se tiene registro fue construido por el ingeniero Luis Jerónimo Fargue. Este modelo se desarrolló sobre un tramo del río Garona. Mas adelante en el año de 1885 en las cercanías del Liverpool se construyó otro modelo realizado por Reynolds, en el cual se visualizó que la relación existente entre la fuerza de inercia y la fuerza de fricción interna es de vital importancia para el diseño de los modelos hidráulicos. Esta relación hoy en día, es conocida como el número de Reynolds, que es un número adimensional y es muy significativa en los modelos hidráulicos actuales.

Más adelante se encontró que la relación entre la fuerza de inercia y la fuerza de gravedad era también importante. Dicha relación fue indicada por el arquitecto Naval William Froude en 1870. Actualmente se le conoce a esta relación como el número de Froude el cual, es adimensional y básico para el análisis de modelos hidráulicos.

1.2 Clases de Modelos

1.2.1. Modelos Matemáticos

Mediante el uso de modelos matemáticos idealizados, los métodos matemáticos plantean soluciones, lo que conlleva a simplificaciones que causan efectos que tienen que valorarse mediante ensayos experimentales, a través de los modelos físicos a escala reducida o de tipo analógico.

El agregado de hipótesis y relaciones de las variables que describen un fenómeno, llegan a conformar un modelo matemático (ecuaciones), que lleva a un problema matemático que es necesario resolver mediante técnicas apropiadas.

1.2.3 Modelos Análogos

Se puede decir que existe analogía entre dos fenómenos de naturaleza diferente si las ecuaciones que los describen se expresan con formas matemáticas idénticas, aún cuando los símbolos de cada una de ellas tengan significado diferente. Comúnmente uno de los dos fenómenos es de menor dificultad, por lo que se lo emplea a este para resolver al otro. Esta última aseveración nos ofrece la posibilidad de resolver problemas hidráulicos en base a mediciones realizadas acerca de algún fenómeno, siendo los mas frecuentes los listados a continuación:

Analogía entre :	
Flujo a través de medios permeables	y Flujo laminar en capas delgadas (modelos de Hele-Shaw)
Flujo laminar	y Flujo turbulento
Flujo a través de medios permeables	y Deformación de una placa elástica bajo carga
Eléctrica	y Otros fenómenos físicos (Hidráulicos, mecánicos, etc.)

1.2.3 Modelos Físicos Reducidos

El uso de los modelos hidráulicos, modelos físicos a escala reducida, implica que debe existir una semejanza entre estos y los prototipos, por lo que se deben satisfacer las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que

en su conjunto relacionan magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas.

Al tratarse la comparación, entre el prototipo y modelo, con respecto a un movimiento, se establecen similitudes cinemáticas. Esto se cumple cuando la forma de los patrones de flujos homólogos son iguales en cualquier tiempo, es decir hay similitud en el movimiento de los sistemas. Esta razón es por la cual la relación de velocidades entre estos puntos debe ser constante y es denominada escala de velocidades. Es un requisito el que se cumpla con la similitud geométrica para que se cumpla la similitud cinemática.

Al realizar una comparación respecto a la similitud geométrica se definirán puntos homólogos sobre los cuales se definen magnitudes como velocidad, presión, etc.; de igual forma se definen lados, superficies y volúmenes homólogos. Dentro de la similitud geométrica, la escala de líneas de longitudes consiste en una relación constante para cualquier longitud L .

No es suficiente que se cumpla con las similitudes geométricas y cinemáticas para que el movimiento de un fluido, en el modelo y en el prototipo sean similares. Es necesario tomar en consideración la acción de las fuerzas sobre las partículas de un fluido: fricción, tensión superficial, gravedad o peso, fuerzas de inercia, de Coriolis, etc. La relación de fuerzas homologas debe ser constante, estableciéndose así la escala dinámica de fuerzas.

Se ha determinado los factores típicos que gobiernan el comportamiento del diseño y modelación de las estructuras hidráulicas comunes.

TIPO DE ESTRUCTURA

FACTORES DE DISEÑO TÍPICOS

1. ESTRUCTURAS DE CONTROL

- a. Tomas
 - b. Muros de Contención
 - c. Compuertas
 - d. Ataguías
 - e. Divisorias de Aguas
- Descarga, niveles de agua, velocidades, pérdidas, presión (fuerzas) vibraciones, inestabilidades, vórtices, demanda de aire, sedimentos, hielo, cavitación, oleaje, patrones de flujo.

2. CONDUCCION

- a. Vertederos
 - b. Canales
 - c. Túneles
- Descarga, niveles de agua, velocidades, pérdidas, entrada de aire cavitación.

3. DISIPADORES DE ENERGÍA

- a. Ampliaciones Abruptas
 - b. Difusores
 - c. Pantallas
- Niveles de agua, pérdidas, presión (fuerzas) vibraciones, abrasión, olaje demanda de aire, cavitación

1.3 Similitud

La similitud trata acerca de la predicción de las condiciones de un prototipo a partir de las observaciones realizadas en los modelos. La similitud es la base de la modelación física y se emplea en los casos en que:

- Nos es imposible o nos es práctico el tratar de obtener una solución analítica o numérica.
- No es posible realizar un prototipo a escala natural, por su tamaño.

Para la mecánica de fluidos usada en la ingeniería civil, la semejanza requerida para asegurar una predicción del comportamiento de una obra de tamaño natural (prototipo) en modelo, deben constituirse semejanzas en: geometría, cinemática y dinámica (representan las dimensiones fundamentales de longitud, tiempo y masa respectivamente).

1.3.1 Similitud Geométrica

La similitud geométrica representa la proporcionalidad entre las dimensiones del modelo con las dimensiones del prototipo.

Se dice que existe semejanza geométrica entre modelo y prototipo cuando el cociente entre todas las longitudes correspondientes es siempre el mismo. Este requerimiento se puede garantizar multiplicando cualquier distancia en el prototipo por un factor de escala constante λ_L .

$$\frac{l_m}{l_p} = e_l = const. \lambda_L$$

Donde:

l_m : longitud semejante del modelo;

l_p : corresponde a cualquier longitud del prototipo;

e_l : escala de longitudes.

Para sistemas Geométricos semejantes:

$$\frac{A_m}{A_p} = e_l^2$$

$$\frac{V_m}{V_p} = e_l^3$$

Donde: A_m , V_m , A_p , V_p son las áreas y volúmenes de modelos y prototipos correspondientemente.

La similitud geométrica se consigue mediante la multiplicación de cualquier distancia del prototipo por un factor de escala constante.

1.3.2 Similitud Cinemática

La similitud cinemática representa la proporcionalidad de velocidades presentes en el modelo y las que se presentan en el prototipo (λ_v).

Una vez verificadas las siguientes características se puede hablar de una semejanza cinética:

- a) Semejanza geométrica cumplida en ambos modelos.
- b) Trayectorias de partículas de los fluidos orientadas de igual forma, con relación a bordes o fronteras de esos sistemas.
- c) Relación constante de velocidades y aceleraciones en puntos semejantes y en momentos de tiempos correspondientes.

$$\frac{u_m}{u_p} = e_v = const.$$

$$\frac{a}{a_p} = e_a = const.$$

Aparece un nuevo concepto a razón de la aparición de la semejanza cinemática: escala de tiempo.

$$\frac{t_m}{t_p} = e_t = const.$$

Donde:

t_m y t_p son los intervalos de tiempo, durante los cuales se llevan a cabo los respectivos fenómenos en el prototipo y en el modelo.

Si cualquier partícula en condiciones reales recorre en el tiempo t_p una distancia l_p , entonces la partícula semejante en el modelo en el tiempo t_m tiene que atravesar un espacio l_m geoméricamente semejante a l_p .

1.3.3 Similitud Dinámica

La similitud dinámica representa la proporcionalidad de fuerzas actuantes sobre las masas correspondientes en el flujo del modelo y en el flujo del prototipo en

todos los puntos del campo de flujo. La existencia de similitud dinámica implica la comprobación de existencia de similitud tanto geométrica como cinemática.

Se trabaja bajo la suposición de que las fuerzas inerciales, de presión, viscosas y de gravedad se encuentran presentes. Esta clase de similitud exige que se mantengan las siguientes proporcionalidades en puntos correspondientes.

Número de Euler: implica proporcionalidad entre fuerzas inerciales y de presión del modelo y prototipo.

$$Eu_m = Eu_p$$

Numero de Reynolds: implica proporcionalidad entre fuerzas inerciales y viscosas del modelo y del prototipo.

$$Re_m = Re_p$$

Número de Froude: implica proporcionalidad entre fuerzas inerciales y gravitacionales del modelo y del prototipo.

$$Fr_m = Fr_p$$

En los flujos de superficie libre como canales y vertederos, la gravedad controla tanto la ubicación como el movimiento de la superficie. Esta influencia de las fuerzas de gravedad e inerciales se ve representada por el numero de Froude.

Las escalas más usadas y útiles deducidas a partir del número de Froude son:

La escala de velocidad:

$$\lambda_v = \lambda^{1/2}$$

La escala de caudal:

$$\lambda_Q = \lambda^{5/2}$$

siendo λ la escala geométrica.

Cada fuerza presente en el problema se reduce de manera diferente, no proporcional, de prototipo a modelo, por lo que no se logra una semejanza dinámica completa. Sin embargo, el modelo puede ser aun una buena representación del movimiento si es que existe una fuerza dominante sobre las demás, pese a la diferente proporción.

Solicitaciones a cumplir para que se de la Similitud Dinámica:

- a) Se encuentran implicadas fuerzas del mismo nombre en cualquier par de puntos.
- b) La escala de las fuerzas es constante, es decir que la razón de las magnitudes de las fuerzas son iguales para el modelo y prototipo.

$$\frac{F_m}{F_p} = e_f = const.$$

- c) Las fuerzas aplicadas en el modelo, están orientadas en relación alas fronteras de éste, de la misma manera que en el prototipo.

1.4 Criterios de Similitud

1.4.1 Numero de Froude

Se usa el número de Froude cuando el flujo característico es de superficie libre es decir en casos como vertederos, embalses, playas, bahías, canales, ríos,

estructuras de control de niveles, compuertas, esclusas, llanuras de inundación, mareas, etc.

Se utilizan criterios energéticos para clasificar el flujo en un canal abierto. Para una descarga determinada, el flujo de energía es una función de su profundidad y velocidad. A continuación se demuestra que el flujo se caracteriza por el número de Froude:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh'}}$$

Donde:

V = velocidad

g = gravedad

h' = altura hidráulica $\Rightarrow h' = \frac{A}{B'}$

A = área hidráulica

B' = ancho de la superficie del agua

Si:

Fr < 1: Flujo subcrítico (lento)

Fr = 1: Flujo crítico

Fr > 1: Flujo supercrítico (rápido)

1.4.2 Numero de Reynolds

Se trata de un número adimensional que define la corriente de un fluido. Es usado para estudiar el movimiento de un fluido en el interior de una tubería o alrededor de un obstáculo sólido.

Se lo puede definir como la relación entre la fuerza de inercia y la fuerza de rozamiento interno de un líquido. Esta representado por las siglas Re y desempeña un papel de suma importancia en los experimentos de modelos hidrodinámicos, ya que los comportamientos de los líquidos tanto en buques, aviones, etc. son iguales cuando sus respectivos números de Reynolds coinciden.

Mediante su uso se puede determinar la velocidad critica o de Reynolds, que especifica limites para los cuales el régimen de circulación puede pasar de laminar ($R < 2100$) a turbulento ($R > 2100$).

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

Donde:

ρ : densidad del fluido

v_s : velocidad característica del fluido

D: diámetro a través del cual circula el fluido

μ : viscosidad dinámica del fluido.

CAPITULO II

ESCALA INFLUYENTE Y PARÁMETROS

2.1 Definición

Se conoce como escala a la relación constante que existe, entre las variables del mismo tipo, con respecto a dos estructuras similares.

Si consideramos a las variables como J_p en el prototipo y J_m en el modelo; en puntos análogos de la estructura, se dice que la escala de la variable J es E_j y esta definida a continuación:

$$E_j = \frac{J_p}{J_m}$$

Según lo anterior se acota que existirán escalas para longitud, el área, el volumen, la velocidad, el caudal, la fuerza, el tiempo, etc.

2.2 Selección de Escala

Con el propósito que el modelo se comporte de manera similar a la del prototipo se tomaron como referencia las leyes generales de escala de similitud hidráulica.

Es por esto que se ha escogido la escala 1:18 debido a que esta permite identificar los diferentes fenómenos y los hace fácilmente visibles, lo cual es el propósito de dicho modelo.

2.3 Determinación de la escala según el espacio y el caudal disponibles

La escala geométrica del modelo se determina a partir del espacio y caudal disponible en el sitio de experimentación.

Se trabajará bajo la suposición que el campo gravitacional es el mismo en el modelo y en el prototipo y la similitud es la de Froude, entonces se tiene:

$$F_p = F_m$$

$$\frac{V_p}{(gL_p)^{1/2}} = \frac{V_m}{(gL_m)^{1/2}}$$

$$E_v = El^{1/2}$$

Pero dado que $Q = A \times V$

$$E_q = E_a E_v$$

Es decir:

$$E_q = El^2 El^{1/2} = El^{2.5}$$

Es decir que el caudal en el modelo se estimaría de la siguiente forma:

$$Q_m = \frac{Q_p}{El^{2.5}}$$

Este es el caudal que corresponderá al máximo caudal que se podrá usar para efectos de la experimentación.

2.4 Coeficientes de Escalamiento

Dado a que en este prototipo de modelo, las fuerzas que predominan son las fuerzas de gravedad e inerciales, las escalas más usadas que se deducen de la semejanza de Froude son:

MAGNITUD DERIVADA	DIMENSION	CRITERIO DE SEMEJANZA DE FROUDE
-------------------	-----------	---------------------------------

TIEMPO (λ_t)	T	$\lambda^{1/2}$
MASA (λ_M)	M	λ^3
VELOCIDAD	LT^{-1}	$\lambda^{1/2}$
VELOC. ANGULAR	T^{-1}	$\lambda^{-1/2}$
ACELERACION	LT^{-2}	1
CAUDAL	$T^3 L^{-1}$	$\lambda^{5/2}$
FUERZA	MLT^{-2}	λ^3
PRESION	$ML^{-1}T^{-2}$	λ

2.5 Traslación de Resultados Obtenidos en el Modelo al Prototipo

Se utiliza los coeficientes de escala para la traslación de resultados en el modelaje hidráulico.

Los coeficientes usados son los siguientes:

Longitud $L_m = L_p/\lambda$

Velocidad $v_m = v_p/\lambda^{1/2}$

$Q_m =$

Caudal $Q_p/\lambda^{5/2}$

Área $A_m = A_p/\lambda^2$

Volumen $V_m = V_p/\lambda^3$

Siendo λ la escala elegida

Los coeficientes de escala de las unidades físicas se las expresa en dependencia de otros coeficientes de escala del modelo.

CAPITULO III

DISEÑO MATEMÁTICO

3.1 Calculo de Caudal mediante el uso del modelo.

EL caudal se lo puede calcular de diferentes formas, una de ellas consiste en el uso de vertederos de pared delgada o mediante mediciones de observación con la ayuda de un cronómetro y las dimensiones de los vertederos.

Esquí (dos bombas)	
Tiempo de llenado de los tanques(seg)	21,52
Volumen de agua tras el vertedero (m ³)	0,01
Altura desde la cresta del vertedero (cm)	1,50
Altura del vertedero (cm)	29,50
Altura de agua sobre el vertedero	1,50
Medicion con tubo en la cresta (cm)	2,10
Medicion con tubo en la parte curva (cm)	25,20
Medicion con tubo en la salida (cm)	12,30
Caudal (Q)=m ³ /seg	0,00
Caudal (Q)=Lt/seg	0,67
Esquí sumergido (una bomba)	
Tiempo de llenado de los tanques(seg)	53,52
Volumen de agua tras el vertedero (m ³)	0,01
Altura desde la cresta del vertedero (cm)	0,50
Altura del vertedero (cm)	29,50
Altura de agua sobre el vertedero (mm)	6,00
Medicion con tubo en la cresta (cm)	1,60
Medicion con tubo en la parte curva (cm)	18,80
Medicion con tubo en la salida (cm)	6,20
Caudal (Q)=m ³ /seg	0,00
Caudal (Q)=Lt/seg	0,27

El caudal utilizado en el dissipador de dados es el mismo que el de Esquí (en el cual se usaban dos bombas).

Para nuestro caso se uso la siguiente información experimental:

$$Q = 0,00066\text{m}^3 / \text{seg}$$

$$Lv = 0,162 \text{ m}$$

$$Cd = 2,225 \text{ (coeficiente de descarga asumido)}^1$$

$h = 0,015 \text{ m}$ en nuestro caso esta altura, es la altura de diseño (Hd) tomada experimentalmente.

3.1.2 Velocidad de Aproximación

Experimentalmente se ha visto que, en modelos sobre vertederos, el efecto en la velocidad de aproximación es insignificante cuando la altura del vertedero es mayor que $1.33 H_d$. Para el experimento propuesto, se tiene que esta relación se cumple y a continuación lo verificaremos:

$$Va = \frac{\frac{Q}{L}}{h + Hd}$$

Al reemplazar los valores se obtiene el siguiente resultado:

Para el caso de vertedero con dos bombas:

$$Va = \frac{\frac{0.00066}{0,162}}{0,29 + 0,015} = 0.0134 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Se puede observar que esta velocidad es despreciable.

¹Ven Te Chow, "Hidráulica de Canales Abiertos"14-4 pág.358

En el caso de la utilización de una sola bomba:

$$Va = \frac{\frac{0.00026667}{0,162}}{0,29 + 0,005} = 0.0055807 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Se puede observar que también se cumple con el propósito de despreciar dicha velocidad de aproximación.

3.1.3 Calculo de la Altura de Velocidad

Dado que no se tiene una velocidad que afecte de manera significativa al fenómeno; y que la altura de velocidad se encuentra relacionada directamente con la velocidad de aproximación, se justifica la cercanía a cero de esta altura y se la desprecia.

$$ha = \frac{Va^2}{2g}$$

$$ha = \frac{0.0134^2}{2 \times 9.81}$$

Altura de Velocidad para el modelo de Esquí y de Dados:

$$ha = 0.00001m$$

Altura de Velocidad para el modelo de Esquí Sumergido:

$$ha = \frac{0.00558^2}{2 \times 9.81}$$

$$ha = 0.00000158m$$

3.1.4 Geometría de la Cresta

A continuación se presentan los cálculos para obtener y comprobar la geometría de la cresta con la siguiente ecuación:

$$X^n = KH_d^{n-1}Y$$

Donde X y Y son las coordenadas horizontales y verticales respectivamente del perfil de la cresta con el origen en el punto mas elevado de ésta; Hd es la altura de diseño (sin velocidad de aproximación considerada), K y n son parámetros que dependen de la cara del vertedero. A continuación se presenta una tabla con dichos parámetros²:

Pendiente de la Cara Aguas Arriba	K	n
Vertical (1 en 1)	2,000	1,850
(3 en 1)	1,936	1,836
(3 en 2)	1,939	1,810
(3 en 3)	1,873	1,776

Para nuestro caso la altura de velocidad es vertical, por lo que, al reemplazar los valores correspondientes en la fórmula obtenemos:

$$X^{1.85} = 2H_d^{1.85-1}Y$$

$$X^{1.85} = 2 \times 1.5^{0.85}Y$$

Al despejar Y obtenemos:

$$Y = 0,3542X^{1.85}$$

²Ven Te Chow, "Hidráulica de Canales Abiertos"14-3 pág.357

Para nuestro caso tenemos una pendiente vertical en donde la pendiente es igual a la primera derivada es igual a 1 y por lo tanto X sería igual a:

$$\frac{dy}{dx} = 0.6553X^{0.85} = 1$$

$X = 1.64 \text{ cm}$ (para dos bombas)

Estos resultados se usan para el caso en que usamos dos bombas.

Para una sola bomba la ecuación arroja:

$$X^{1.85} = 2H_d^{1.85-1}Y$$

$$X^{1.85} = 2 \times 0.5^{0.85}Y$$

Al despejar Y obtenemos:

$$Y = 0,901X^{1.85}$$

$$\frac{dy}{dx} = 1.66685X^{0.85} = 1$$

$X = 0.5482 \text{ cm}$ (para una bomba)

Coordenadas para graficar la curva de la cresta, para el modelo de Esquí.

X(cm)	Y(cm)
0,1	0,0050
0,2	0,0180
0,3	0,0382
0,4	0,0650
0,5	0,0983
0,6	0,1377
0,7	0,1831
0,8	0,2344
0,9	0,2915
1	0,3542
1,1	0,4225
1,2	0,4963
1,3	0,5755
1,4	0,6601
1,5	0,7499
1,6	0,8450
1,64	0,8845

Coordenadas para graficar la curva de la cresta, para el modelo de Esquí sumergido.

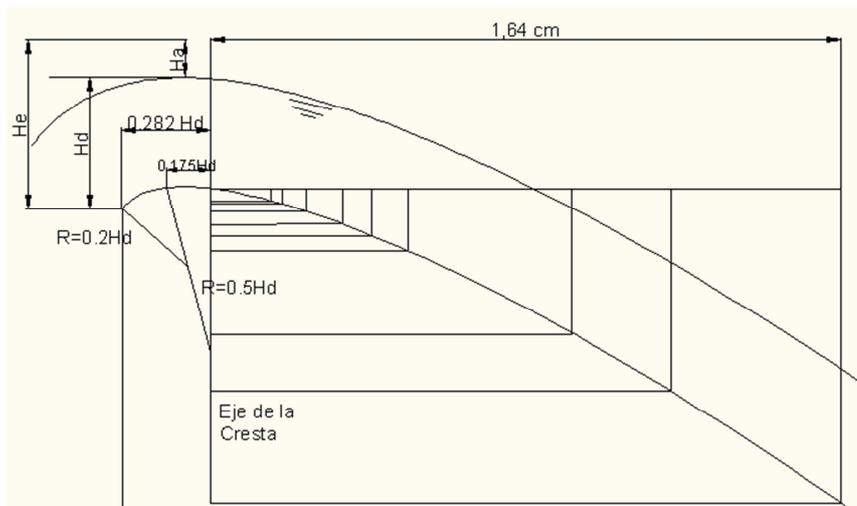
X(cm)	Y(cm)
0,1	0,013
0,2	0,046
0,3	0,097
0,4	0,165
0,5	0,250
0,5482	0,296

Por cuestiones constructivas se escoge el vertedero para el cual se cumplen las dos condiciones de curvatura que en este caso es la primera ecuación.

Una forma alternativa de diseño es la utilizada mediante una saliente (líneas punteadas). La forma de la cresta no se va a ver afectada por estos detalles,

siempre y cuando dicha modificación empiece por lo menos en la mitad de la altura total H_e verticalmente por abajo del origen de coordenadas.

Las velocidades verticales son pequeñas e insignificantes por debajo de esta profundidad y el efecto en el perfil de flujo de la napa es despreciable.



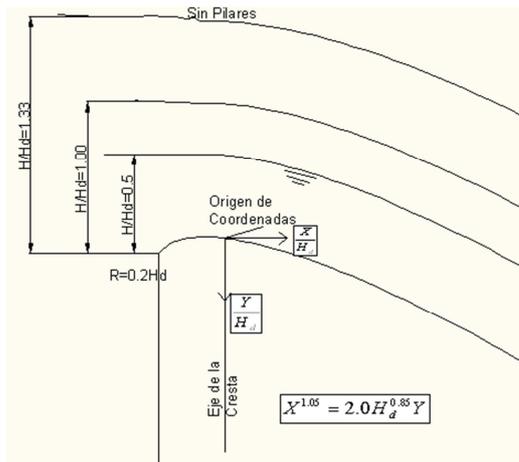
3.1.5 Perfil de la Napa Superior del Flujo en Vertederos

Para diseñar vertederos, de descarga libre, y la sección de la elevación del pivote de vertederos controlados con compuertas radiales, se hace necesario y fundamental conocer la forma del perfil de la napa superior sobre la cresta del vertedero. A continuación se presentan la forma y las coordenadas para el perfil de la Napa Superior, con velocidades de aproximación muy bajas, con pilares o sin ellos, y para 3 diferentes relaciones de altura, obtenidas a partir de las pruebas investigadas en modelos, por parte de del U.S. Army Engineers Waterways Experimet Station.

Al estar la superficie de la napa expuesta a la atmosfera, se debe tener consideraciones de alteración debido a viento, corrientes de aire y a la

absorción del aire circundante. Como consecuencia el flujo obtenido es aireado y la superficie inestable y ondulada.

Las coordenadas de la napa superior que se presentan, únicamente están basados para condiciones ideales, donde no se toman consideraciones de alteración por viento.³



$H/H_d=0.5$		$H/H_d=1.00$		$H/H_d=1.33$	
X/H_d	Y/H_d	X/H_d	Y/H_d	X/H_d	Y/H_d
-1,000	-0,490	-1,000	-0,933	-1,000	-1,210
-0,800	-0,484	-0,800	-0,915	-0,800	-1,185
-0,600	-0,475	-0,600	-0,893	-0,600	-1,151
-0,400	-0,460	-0,400	-0,865	-0,400	1,110
-0,200	-0,425	-0,200	-0,821	-0,200	-1,060
0,000	-0,371	0,000	-0,755	0,000	-1,000
0,200	-0,300	0,200	-0,681	0,200	-0,019
0,400	-0,200	0,400	-0,586	0,400	-0,821
0,600	-0,075	0,600	-0,465	0,600	-0,705
0,800	0,075	0,800	-0,320	0,800	-0,569
1,000	0,258	1,000	-0,145	1,000	-0,411
1,200	0,470	1,200	0,055	1,200	-0,220
1,400	0,705	1,400	0,294	1,400	-0,002
1,600	0,972	1,600	0,563	1,600	0,243
1,800	1,269	1,800	0,857	1,800	0,531

*Basado en las pruebas CW 801 para velocidad de aproximación insignificante

³Ven Te Chow, "Hidráulica de Canales Abiertos" 14-6 pág.362-363

3.2 Calculo del Cuenco Disipador

Se Requiere saber la velocidad con la que el agua entra al disipador y para esto se usara la Ecuación de la Energía de Bernoulli.

Las variables no se pueden modelar exactamente en el prototipo y ese cálculo se lo realizo con las medidas del modelo.

Valores de medidas:

$$P= 0.30 \text{ m}$$

$$Hd=0.05 \text{ (una bomba) m}$$

$$Hd2=0.015 \text{ (dos bombas) m}$$

$$\Delta z=0.01 \text{ m}$$

$$Q1=0.0002678 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q2=0.000666 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$B=0.162 \text{ m}$$

$$g=9,81 \text{ m/s}^2$$

Usando la Ecuación de la Energía y despreciando las perdidas en la rápida del vertedero se obtiene

$$P + Hd - ha = h1 + \frac{V^2}{2g}; V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{B h1}$$

$$P + Hd - ha = h1 + \frac{Q^2}{B^2 h1^2 2g}$$

$$0.3 + 0.015 - 0.01 = h_1 + \frac{0.00000007172}{0,515 * h_1^2}$$

$$0.305 = h_1 + \frac{1.39E - 7}{h_1^2}$$

$$h_1^2 * 0.305 = h_1^3 + 0.305 = h_1 + 1.39E - 7$$

$$h_1 = 0.305 \text{ cm}$$

$$V_1 = \frac{Q}{B h_1} = \frac{0.000666}{0.162 * 0.00305}$$

$$V_1 = 1.348 \text{ m/s}$$

V1 es la velocidad de salida del vertedero y la de entrada al disipador. Para nuestro experimento el número de Froude es de:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gh_1}}$$

$$h_1 = h_1'$$

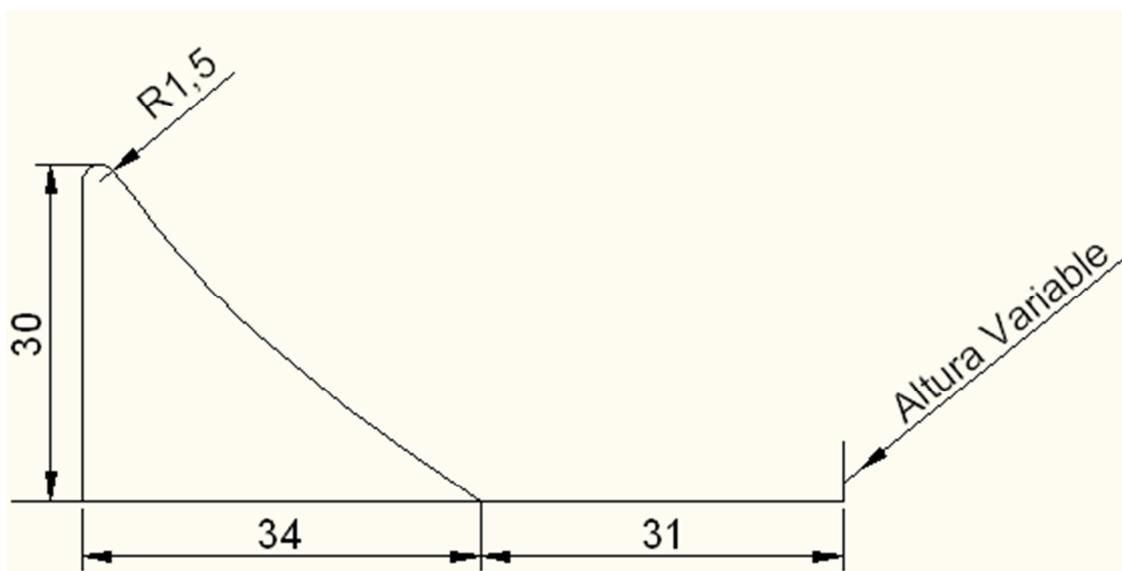
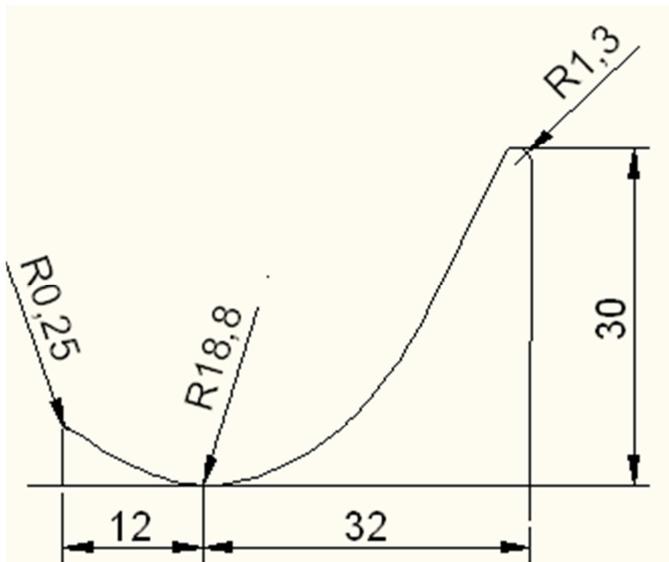
$$F_1 = 7.8 \gg 4.0$$

Para este número de Froude el disipador apropiado es el USBR tipo II. La altura de los disipadores del modelo serán variables, para observar las consecuencias de dicha variación en la observación de los fenómenos que ocurren en la disipación.

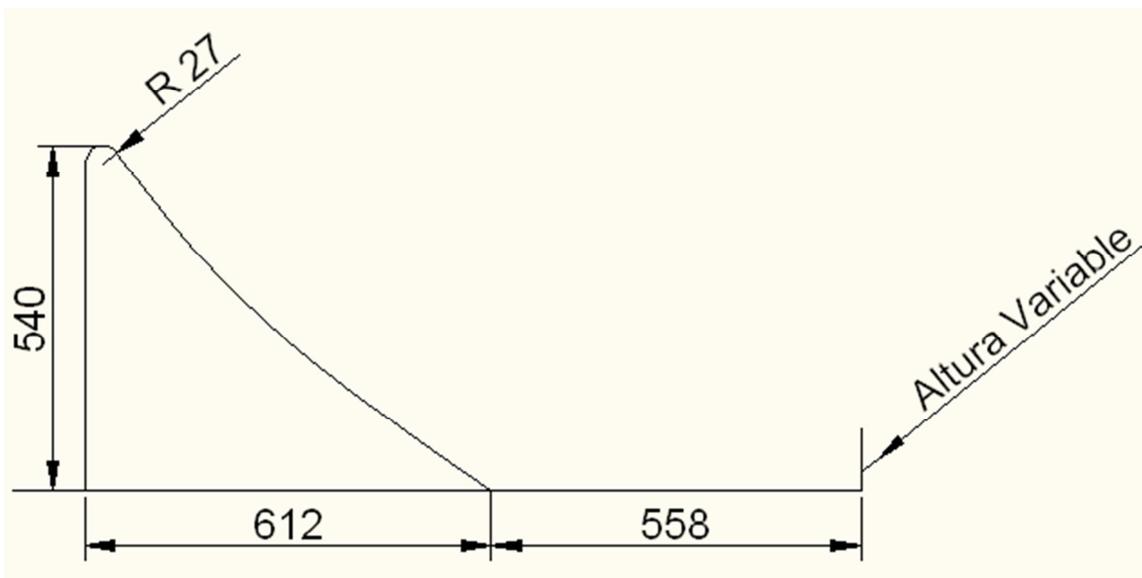
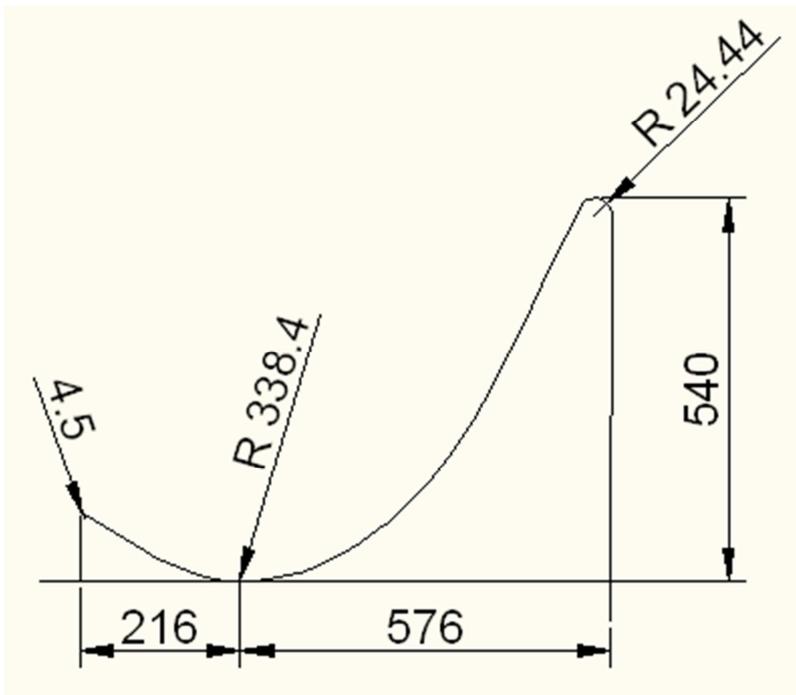
3.3 Medidas del Prototipo

3.3.1 Medidas en el modelo

Las medidas presentadas a continuación están dadas en centímetros.



3.3.2 Medidas del Prototipo



Las alturas variables del disipador y sus correspondientes medidas en el prototipo se presentan a continuación.

Altura de Disipador (cm) en el modelo	Altura de Disipador en el Prototipo (cm)
2,50	45
3,00	54
3,50	63
4,00	72
4,50	81
5,00	90

CAPITULO IV

CONSTRUCCION DEL MODELO FISICO

4.1 Bases para el Diseño

Para la construcción del modelo físico se tomo en cuenta los valores obtenidos anteriormente con el diseño matemático del fenómeno. Así mismo las medidas de las piezas se las acopla con el diseño y escalamiento del prototipo.

4.2 Materiales Utilizados en la Construcción del Modelo

Como objetivo final de la presente disertación se tiene, el mostrar e identificar los fenómenos hidráulicos generados en los diferentes tipos de disipadores de energía. Dado el fin de la disertación se hace necesario el uso de un material que permita la visualización de tales fenómenos. De esta forma se brinda al estudiante una oportunidad valiosa para entender los fenómenos ya mencionados y la materia dictada en aulas.

Los materiales deben ser caracterizados por su versatilidad y facilidad de uso al momento de la construcción del modelo, sin dejar de lado el valor estético que pueden poseer, debe primar el valor didáctico para los estudiantes. Los materiales deben ser tales que su periodo de vida sea lo mas largo posible, dadas las solicitudes a las que va a estar sometido el modelo.

Materiales Utilizados en la Construcción del Modelo Hidráulico:

- Perfiles metálicos: utilizados para la configuración de las estructuras de soporte del modelo y paredes de los canales.
- Madera contrachapada: Utilizada como soporte de la bomba de succión y del modelo físico.
- Mangueras: utilizadas en la recirculación del agua del circuito del modelo.
- Accesorios P.V.C.: usados en el sistema de recirculación del agua.
- Accesorios de Polipropileno: usados en el sistema de recirculación del agua.
- Bomba de succión: permite la recirculación del agua durante los ensayos en el modelo.
- Cable de luz: usado para la toma de energía, para el funcionamiento de las bombas.
- Botonera: control de encendido y apagado de la bomba de succión.
- Láminas de Acrílico: usadas para la conformación de canales y vertederos del modelo físico.
- Silicón Transparente: permitirá la hermetización del modelo para evitar fugas de agua y garantizar su correcto funcionamiento.
- Pernos de Acero: brindan aseguramiento y conformación de un solo cuerpo uniendo las partes del modelo.

4.2.1 Acrílico

Tras haber estudiado los posibles materiales que se pudieran usar en el modelo, se optó por el acrílico dadas sus características de resistencia y durabilidad en el tiempo y condiciones climáticas adversas. El acrílico tiene la propiedad de permanecer sin ningún cambio en sus propiedades al estar expuesto a la intemperie, dada su resistencia a los rayos ultravioleta.

Aparte de su gran versatilidad para su fácil manejo, el acrílico tiene la característica de ser un material que no produce astillas, por lo que se hace menos probable la aparición de lesiones o heridas al momento de su manejo.

Dada su alta resistencia a los golpes, el acrílico tiene una vida útil mayor que la mayoría de materiales analizados, prolongando así también la vida útil del modelo.

Desde la perspectiva ecológica el acrílico es material reciclable en un 100%. Otra de sus características principales es su transparencia. Sumando todo el conjunto de las características, el acrílico supera al vidrio que fue otra opción.

A continuación se enlistan las propiedades del acrílico:

PROPIEDADES	UNIDAD	MAGNITUD
DUREZA		HCN-96
ABSORCIO DEL AGUA	%	
GRAVEDAD ESPECIFICA		1.19
ESFUERZO DE FLEXION:		
ESFUERZO DE FLEXION	kg/cm ²	1.052
MODULO FLEXURAL	kg/cm ²	31.264
ESFUERZO DE IMPACTO	kg/cm ²	1.1
ESFUERZO DE CORTE	kg/cm ²	600-650

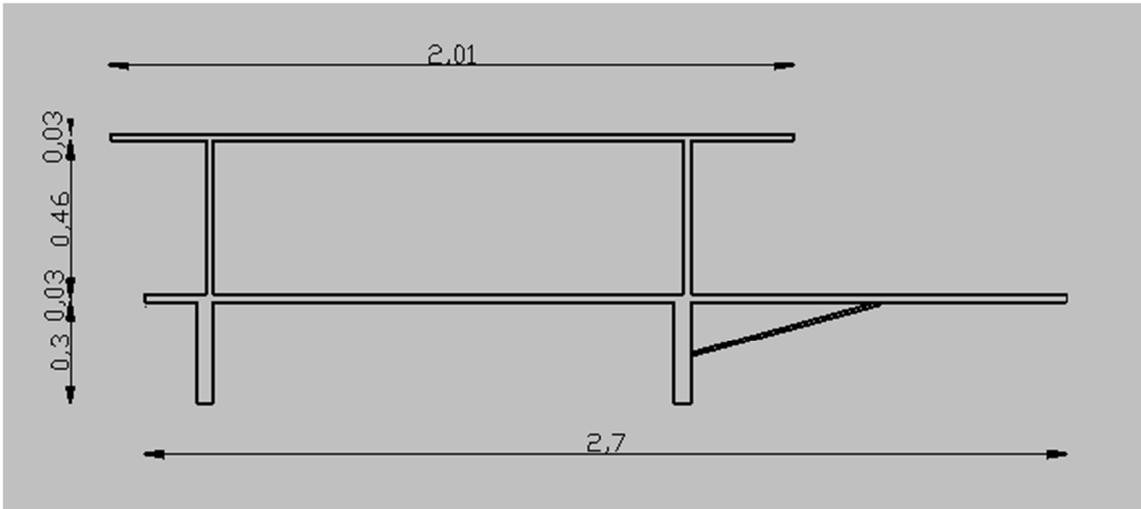
CALOR ESPECIFICO	Cal/g°C	0.35
TEMPERATURA DE DISTORSION AL CALOR (4.6 Kg/cm)	°C	100
COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD DE CALOR	Cal/s*cm ²	4.5 x 10 ⁻⁴
COEFICIENTE OF LINER A EXPANSION	Cm/cm °C	6.5 x 10 ⁻⁵
TRANSDUCTIBILIDAD:		
RAYOS PERPENDICULARES	%	93.3
RAYOS PARALELOS	%	0.27
HAZE	=	
TEMPERATURA ULTIMA DE CONTINUA OPERACIÓN	°C	60-90
FLAMABILIDAD	Mn/min	33
SUPERFICIE RESISTENTE A 28 °C	Ohm	>1016
VOLUMEN RESISTENTE	Ohm cm	>1015
RANGO DE TERMOFORMIBILIDAD	°C	140-180
ESFUERZO DIELECTRICO	Kv/Mn	20
RUGOSIDAD RELATIVA		0.0015

4.3 Construcción del Modelo

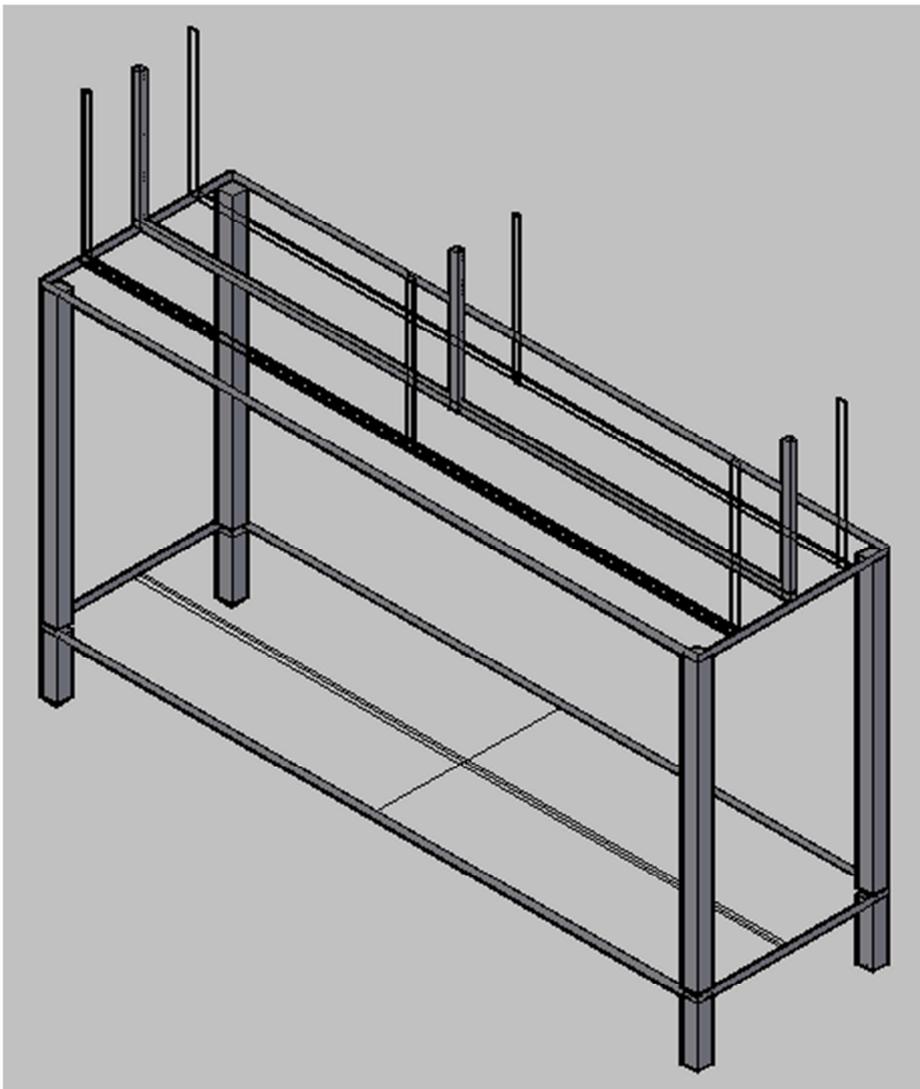
Luego de haber realizado el prediseño se procedió a construir el modelo. Se procedió a contratar el servicio de construcción de la mesa y de perfiles de acero, según las especificaciones que obtuvimos del prediseño, dado que no se contó con la ayuda de talleres en la universidad.

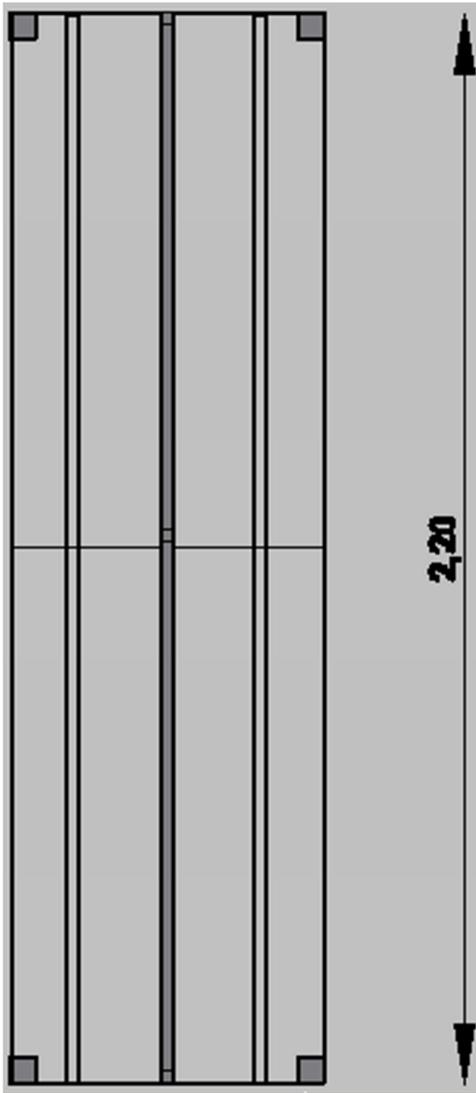
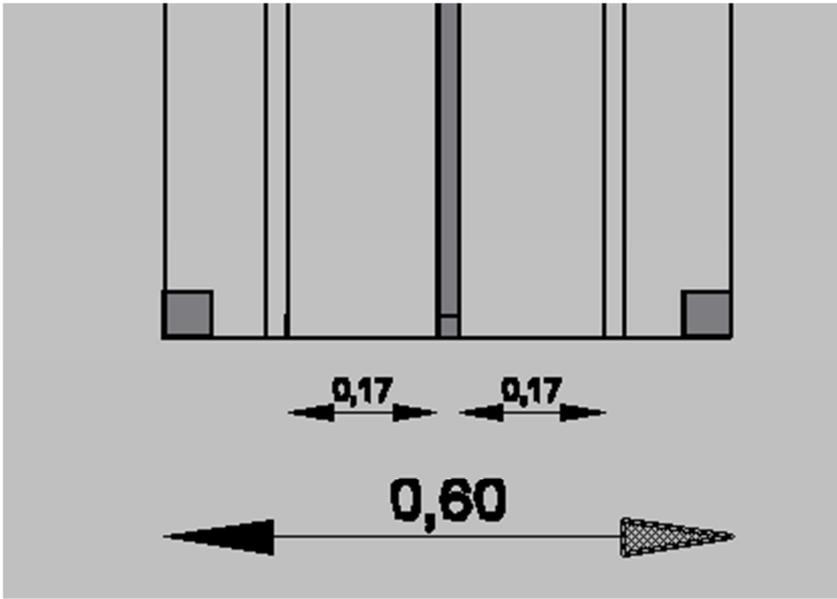
Se escogió usar un perfil metálico tipo L de espesor 2.5 mm, con lo que el modelo tendrá firmeza y durabilidad.

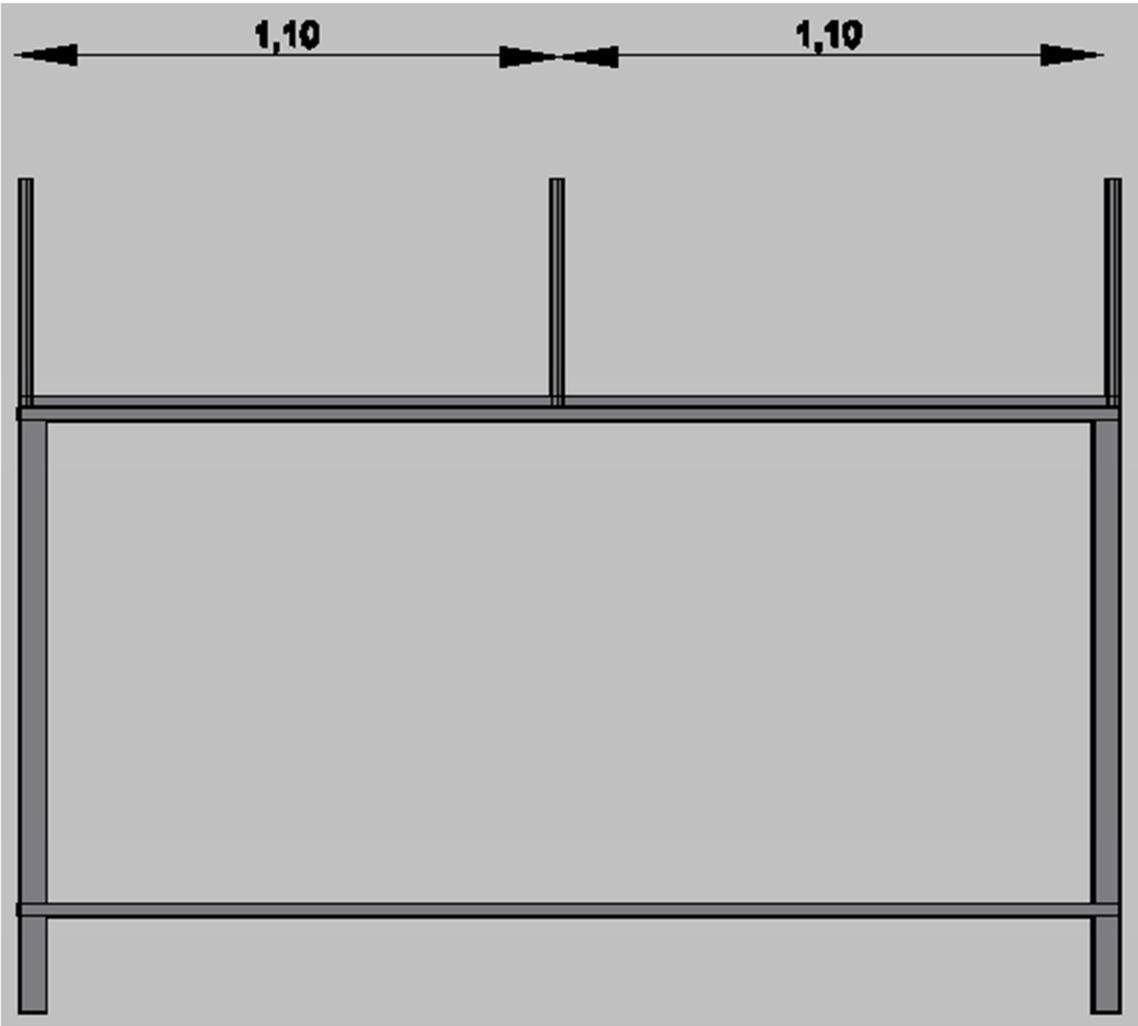
A continuación se presentaran los prediseños:



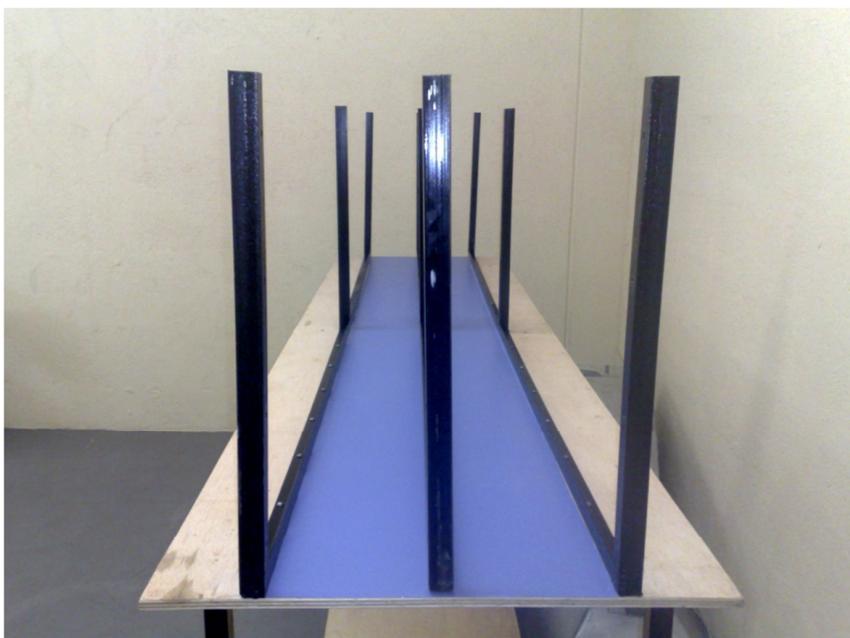
Dado el espacio reducido que se nos otorgo en la universidad se tuvo que modificar las escalas nuevamente:







Se procedió al armado de las piezas del modelo:



Como se puede observar la mesa ya esta armada y los perfiles se los aseguro con pernos de acero, para más tarde realizar lo mismo con las planchas de acrílico. Se procedió a su corte y armado para conformar las paredes del canal.



Con el caudal de 0.67 lt/seg se procedió al diseño del vertedero (azud), para lo cual se asumieron datos como

Altura del Azud (h) = 30 cm

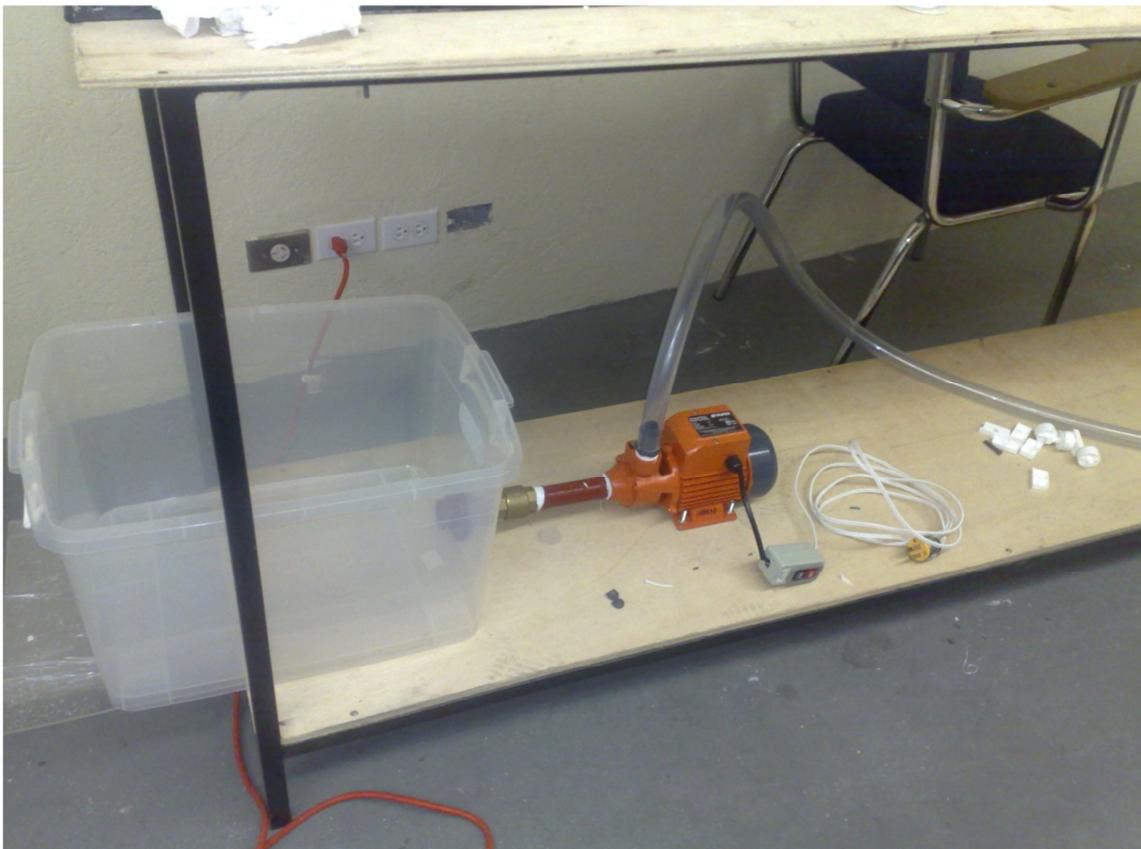
Long. Del vertedero (Lv) = 32 cm

$h/H_d > 1.33$ por lo que el Coef. De Descarga (Cd) = 2.23

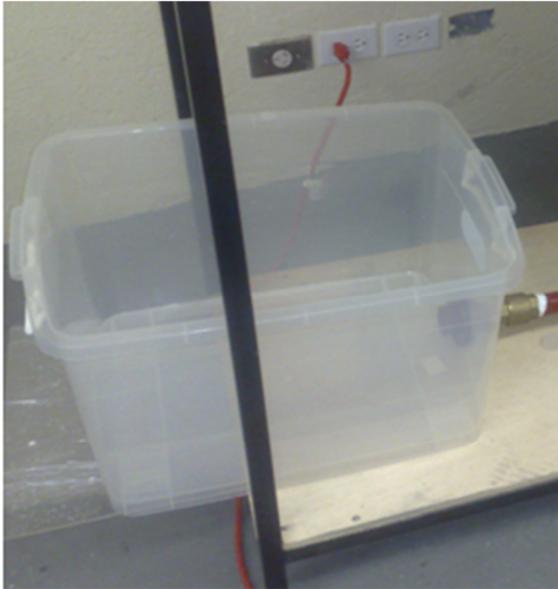
Angulo de pendiente con el punto de tangencia = 45°

Con estos datos se obtuvo un $H_d=0.015$ m. lo cual era una altura adecuada.

Se pudiera aumentar el caudal mediante la ayuda de una bomba de un caballaje mayor a la $\frac{1}{2}$ HP que es usada.

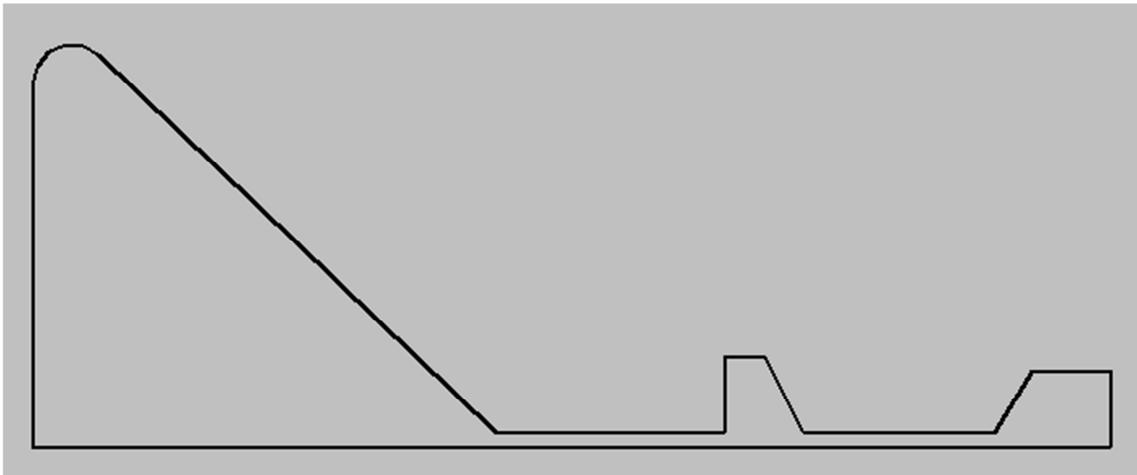


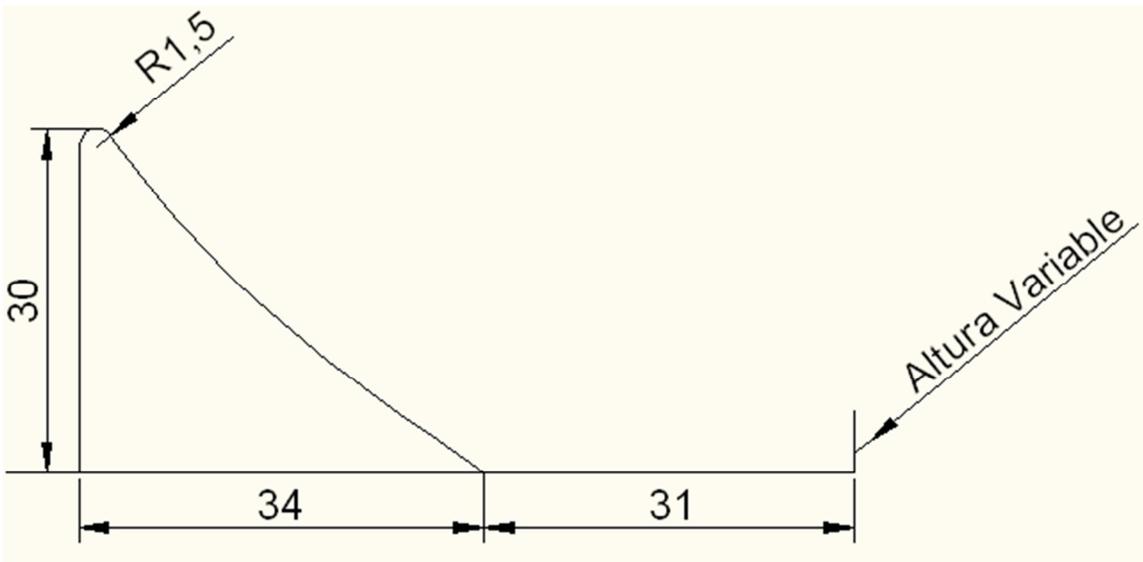
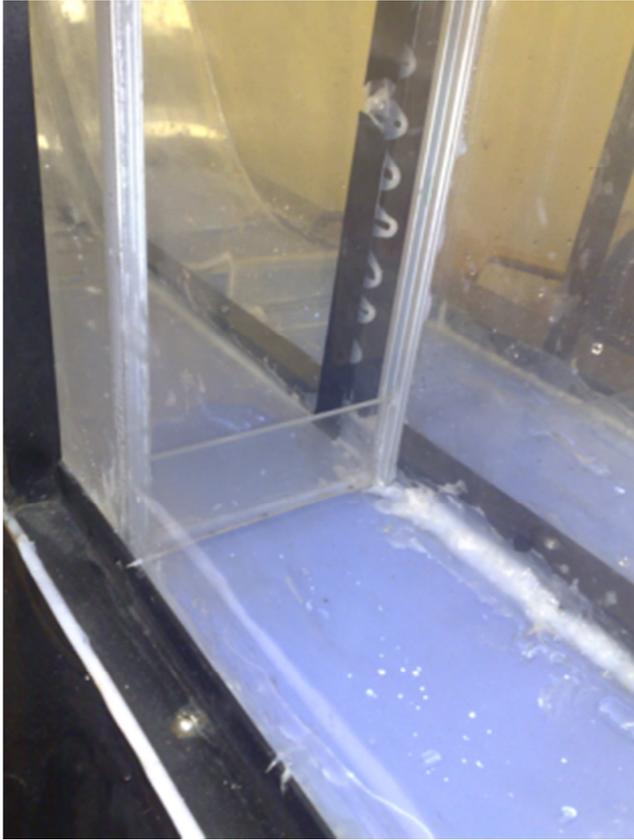
Debido a que el modelo debe ser abastecido con agua continuamente para la realización de las prácticas, se conformo un sistema de recirculación para cumplir con este objetivo.



Con el nuevo caudal se procedió a realizar las medidas correspondientes para así diseñar el disipador propuesto (Cuenco Disipador US Bureau of Reclamation II).

Al ver que los requerimientos para este disipador se cumplieron se procedió al diseño y construcción del mismo. Para nuestro caso el cuenco disipador Bureau of Reclamation II se ha simplificado por razones constructivas.





Para el siguiente dissipador se decidió usar uno de tipo de salto de esquí, usando los siguientes datos:

Altura del Azud (h) = 30cm

Long. Del vertedero = 32cm

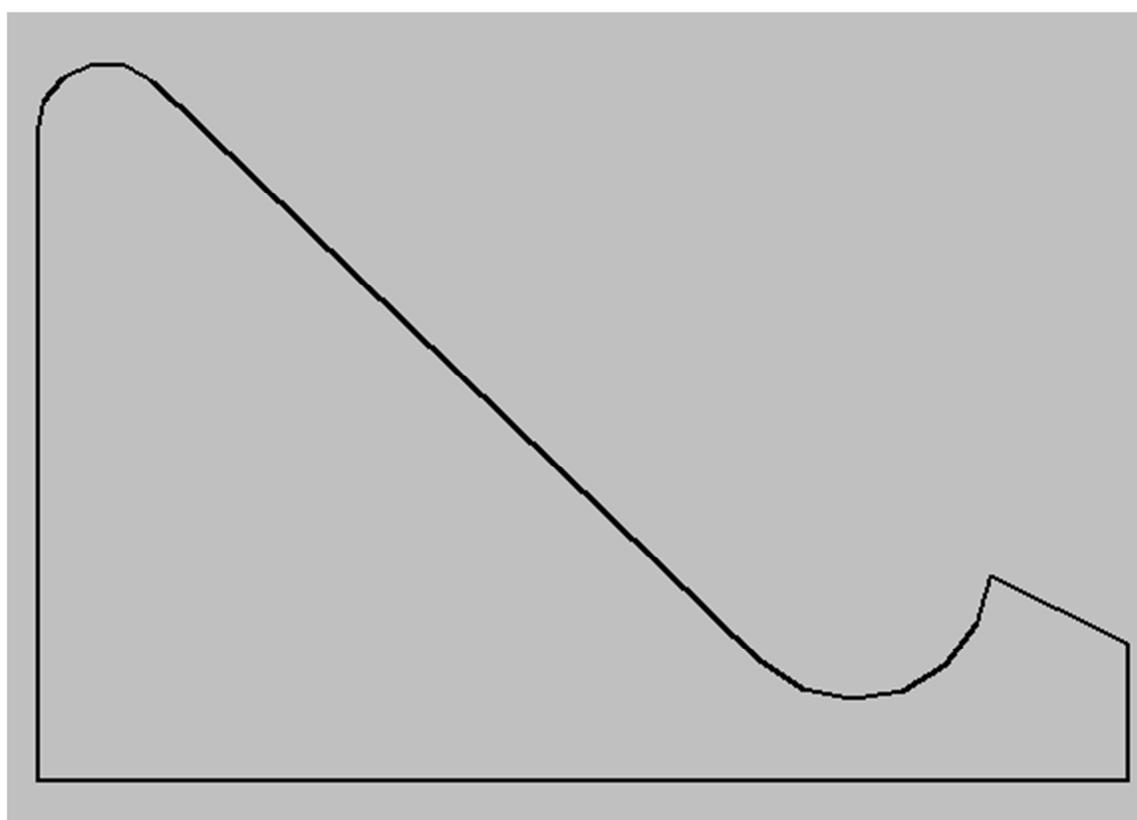
$h/H_d > 1.33$ por lo que el Coef. De Descarga (C_d) = 2.23

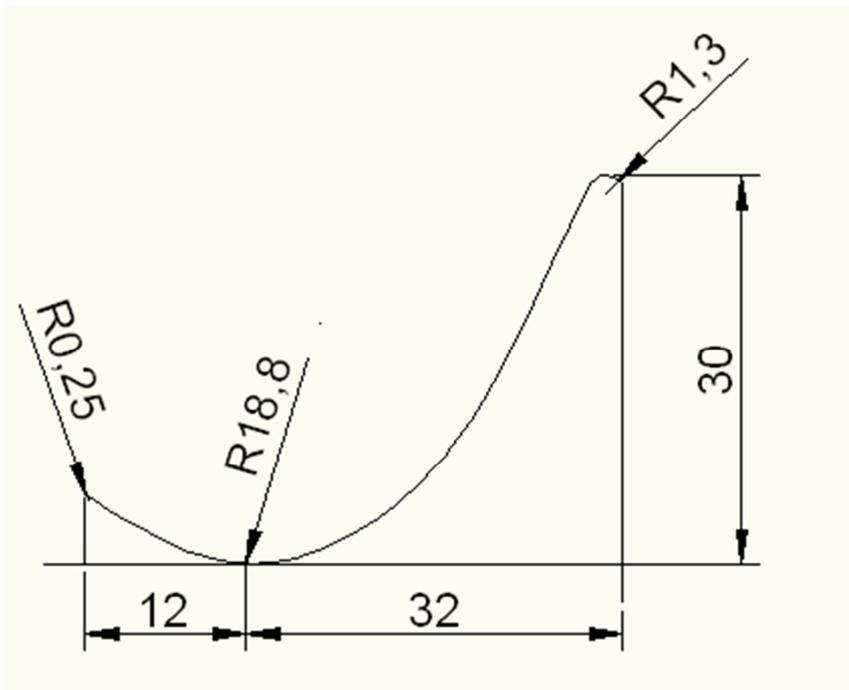
Angulo de pendiente con el punto de tangencia = 45°

Con estos datos se obtuvo un $H_d=0.5$ cm con una bomba para Esquí sumergido y $H_d=1.5$ cm con dos bombas; lo cual era una altura adecuada.

Se podría aumentar el caudal mediante la ayuda de una bomba de un caballaje mayor a la $\frac{1}{2}$ HP que es usada, y de hecho se utilizaron dos bombas en el modelo para poder observar los fenómenos en distintas condiciones de caudal.

El ángulo de salida para el esquí fue de 35° lo cual es suficiente para observar el comportamiento y pérdida de energía producidos en el ensayo.





De esta forma se obtuvo dos canales de 16.2 cm con sus respectivos vertederos.

Durante el proceso para el pegado de las piezas de acrílico se usó silicona y como cloruro de metileno para conseguir un buen hermetismo.

Para la medición de la velocidad del flujo del modelo se construyó un tubo pitot, cuyo proceso se constituye en el doblado del tubo de vidrio y luego en el esmerilado de la punta a la entrada del mismo. Se debe tomar en cuenta que en ninguno de estos pasos se debe disminuir el diámetro del tubo.

Para conseguir el doblado del tubo se procedió a calentar el mismo con la ayuda de un soplete a gas.



4.4 Herramientas de Medición y Control

4.4.1 Instrumentos Utilizados en la Medición

Dentro de un canal la velocidad del flujo es variable, y lo hace desde una velocidad casi nula en la cresta del vertedero hasta la velocidad máxima al terminar la rápida.

De acuerdo al resalto producido se pueden obtener los resultados. La manera de comparar los resultados, consiste en tomar en cuenta las velocidades que lleva el flujo en un espacio determinado, así se puede demostrar que la disipación buscada es la correcta y que es generada adecuadamente.

Existen varias formas para medir la disipación; una de las mismas consiste en conocer la sección de la superficie mojada, aparte del caudal que ya se determinó. A partir de lo anterior se puede llegar a conocer fácilmente el valor de la velocidad.

Otra manera de conocer la velocidad del flujo en un punto determinado se la lleva a cabo con la utilización de un tubo Pitot.

4.4.1.1 Tubo Pitot

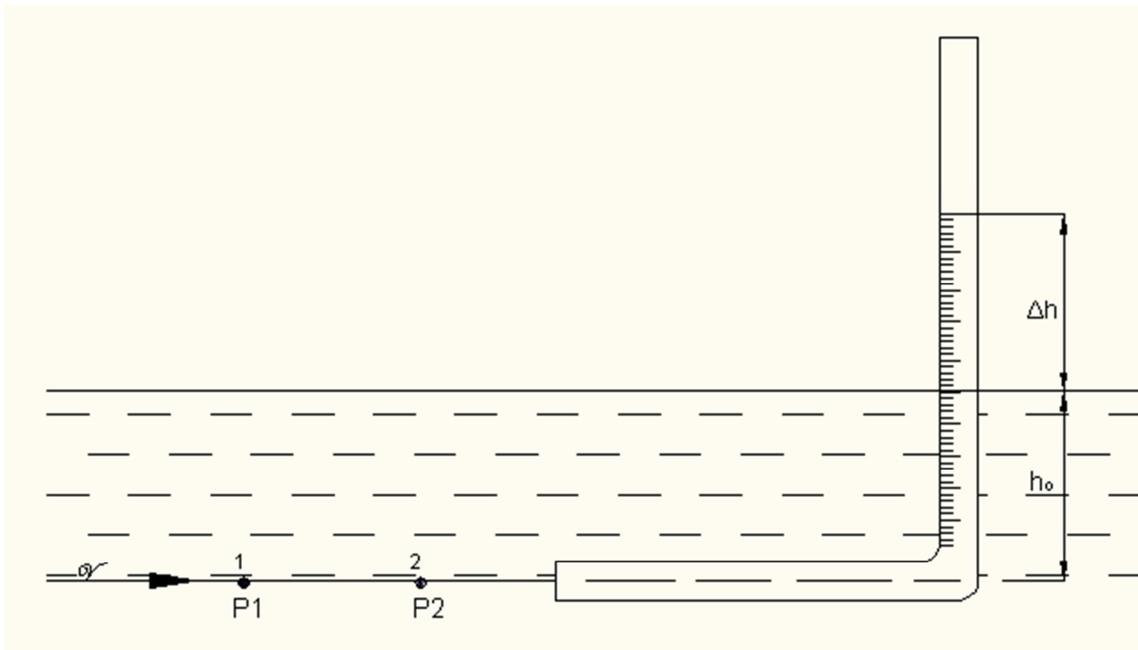
La utilización de un tubo Pitot es una de las formas más antiguas de medir la presión diferencial y a su vez llegar a conocer la velocidad de circulación del fluido.

El modo de funcionamiento de dicho artefacto es el siguiente: la velocidad del fluido en la entrada del tubo llega a ser cero, dado que este es un punto de estancamiento, así la energía cinética se transforma en energía de presión, lo que nos lleva a un aumento de la presión dentro del tubo Pitot.

Dado que la determinación de la velocidad en cierto número de puntos de una sección transversal nos permite evaluar la descarga, la medición de la velocidad es una etapa importante al medir el flujo. Como se conoce, la determinación de la velocidad se lo hace tomando el tiempo que una partícula requiere, para viajar una distancia determinada. Esta técnica se desarrolló para estudiar el flujo en regiones muy pequeñas, de tal forma que el flujo normal sería alterado y posiblemente desaparecería, si se introdujera un instrumento de medición de velocidad.

El tubo Pitot consiste en un tubo de vidrio o una jeringa hipodérmica con un doblez a 90° y es utilizada para medir la velocidad V en un canal abierto. La abertura del tubo se coloca corriente arriba, de modo tal que el líquido fluye por

la abertura hasta que la presión en el tubo aumenta lo suficiente como para resistir el impacto de la velocidad contra el mismo. Frente a la abertura el fluido se encuentra en reposo. La dirección de la línea de corriente pasa a través del punto 1 al punto 2 (punto de estancamiento donde el fluido se encuentra en reposo); en este punto la línea de flujo se divide y circula alrededor del tubo. La presión en el punto 2 es determinada mediante la medición de la columna del líquido en el tubo. Al aplicar la ecuación de Bernoulli entre los dos puntos (1 y 2) se llega a tener :



$$\frac{v^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} = h_o + \Delta h$$

Como se puede ver que los dos puntos tienen la misma elevación y $\frac{P_1}{\gamma} = h_o$ la

ecuación anterior se transforma a: $\frac{v^2}{2g} = \Delta h$

La cual se la puede ver de otra forma: $v = \sqrt{2g * \Delta h}$

En realidad es muy difícil leer la altura Δh de una superficie.

La medición realizada por el tubo Pitot se la conoce como presión de estancamiento o como presión total. Esta presión está conformada por dos partes:

1.- Presión estática: h_0

2.- Presión dinámica: Δh (Expresada en función de la altura de la columna de del fluido en movimiento.)

La presión dinámica se relaciona con la carga de velocidad mediante la siguiente ecuación:

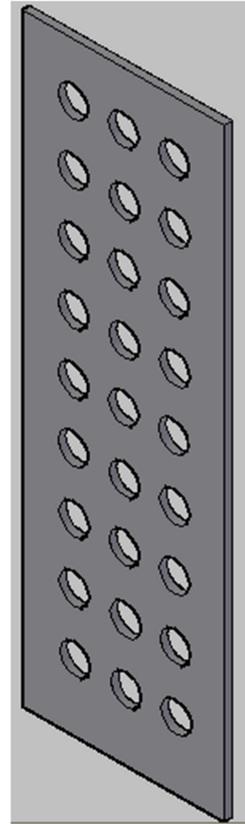
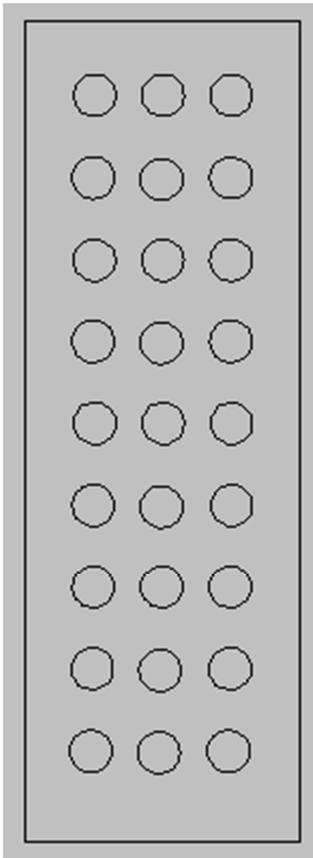
$$\frac{v^2}{2g} = \Delta h$$

4.4.2 Herramientas Utilizadas Para el Control

4.4.2.1 Pantallas de acrílico con Perforaciones

La bomba de succión arroja al tanque de demasías el agua con velocidad, a causa de esto la velocidad de aproximación podría verse afectada. Para mitigar este efecto se decidió utilizar una pantalla agujereada de manera que el flujo se estabilice y la velocidad con que la bomba suministra el agua se ve neutralizada.

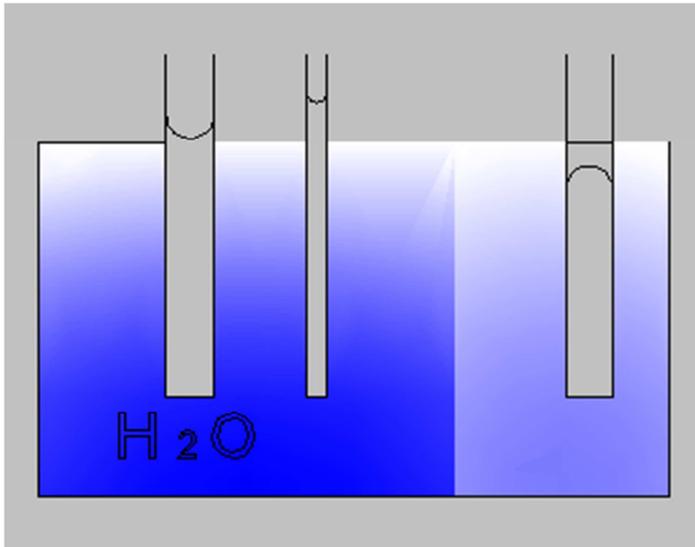




4.4.3 Calibración de Instrumentos

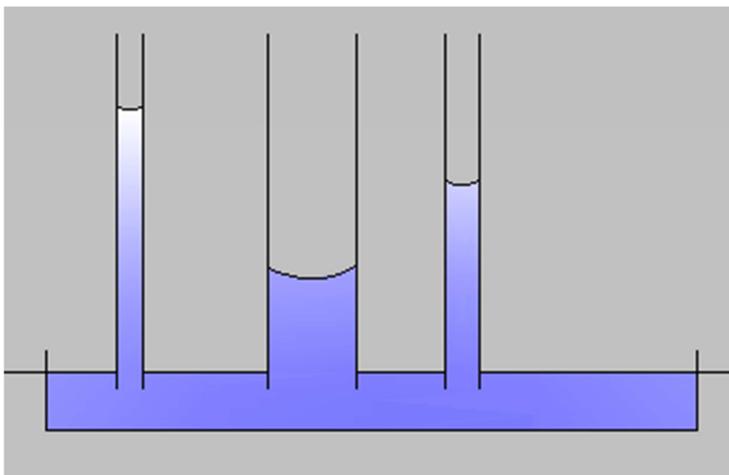
4.4.3.1 Corrección por Capilaridad en Tubo Pitot

La cualidad que posee una sustancia para absorber un líquido es conocida como capilaridad. Este fenómeno tiene cabida cuando las fuerzas intermoleculares adhesivas entre líquido y sólido son mayores que las fuerzas intermoleculares cohesivas en el líquido. Este es el motivo causal que se pueda observar un menisco cóncavo cuando el líquido se encuentra en contacto con una superficie vertical.



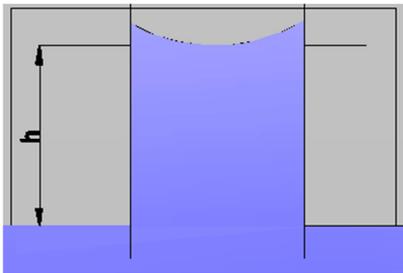
El tubo Pitot succiona el líquido, en este caso el agua, contra la fuerza de gravedad. Cuando la parte inferior de un tubo de vidrio es colocada verticalmente de manera vertical, en contacto con líquido (agua) se forma el menisco cóncavo; la tensión superficial succiona la columna líquida, contra la fuerza de gravedad, hacia arriba, hasta que el peso del líquido llega a tal punto en que la fuerza de gravedad se equilibra con las fuerzas intermoleculares.

La capilaridad tiene importancia para diámetros menores, aproximadamente, que 10mm y deja de ser significativa para diámetros mayores que 12mm.



La altura alcanzada al equilibrarse el peso de la columna de líquido y la fuerza de ascensión por capilaridad esta definida por la ley de Jurin⁴. La altura h en metros de columna liquida esta dad por la ecuación⁵:

$$h = \frac{2\gamma\cos\theta}{\rho g r}$$



Donde:

γ = tensión superficial

Θ = ángulo de contacto

ρ = densidad del líquido (kg/m^3)

g = aceleración debido a la gravedad (m/s^2)

r = radio del tubo (m)

⁴ <http://es.wikipedia.org/wiki/Capilaridad>

⁵ "Química Física para ingenieros Químicos" Escrito por Consuelo Jiménez, Juan Soto, Luis A. Villaescusa, pág. 141 – 142

a) Tensión Superficial

Fenómeno por el cual la superficie de un líquido tiende a comportarse como si fuese una delgada película elástica.

El valor del coeficiente de tensión superficial depende del líquido, del medio que lo rodea y de la temperatura⁶. Al aumentar la temperatura, la tensión superficial disminuye, dado que las fuerzas de cohesión disminuyen cuando la temperatura es mayor.

El siguiente cuadro presenta los valores obtenidos empíricamente para las diferentes temperaturas.⁷

Coeficiente de Tensión Superficial del Agua	
Temperatura [°C]	γ[N/m] x 10⁻³
0	75.64
10	74.22
20	72.75
30	71.18
40	69.56
50	67.91
60	66.20
100	58.99

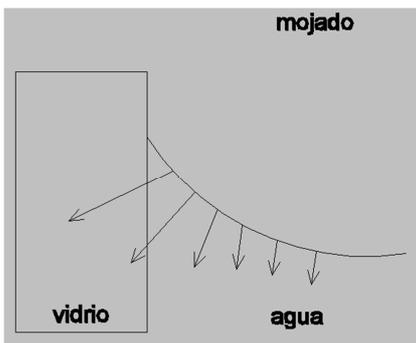
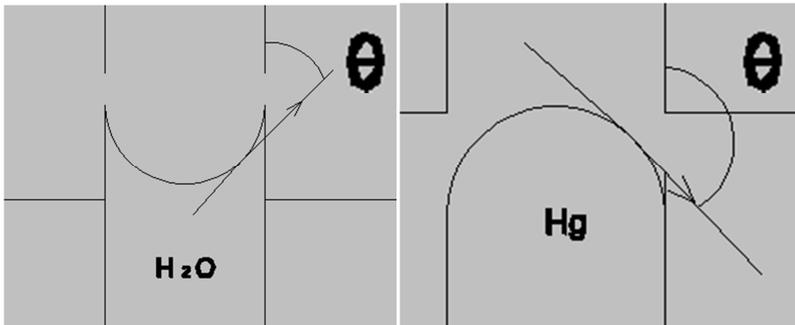
Para la determinación del coeficiente de tensión superficial del agua, en el ensayo, la temperatura deberá ser tomada al momento de realizar ensayo.

⁶ http://www.ugr.es/~fisicat/Departamento/Apuntes/T_Fenomenossuperficiales2H.pdf

⁷ <http://www.gae.usm.es/fisatom/docencia/labofis/practicasi/0509/prac10-0506.pdf>

b) Angulo de Contacto

La determinación del ángulo de contacto se vuelve una tarea difícil dado que para tubos de diámetros pequeños es complicado precisarlo. Este ángulo esta formado por la tangente a la superficie del menisco en el punto de contacto con el sólido.



Dado que el agua es un líquido que moja la pared del sólido en su totalidad el ángulo de contacto θ será igual a cero.⁸

⁸http://www.ugr.es/~fisicat/Departamento/Apuntes/T_Fenomenossuperficiales2H.pdf

Sustancia	Angulo de Contacto (grados)
Agua – Vidrio	0
Liquidos organicos(la mayoría) - Agua	0
Mercurio – Vidrio	140
Agua – Parafina	107
Keroseno – Vidrio	26

En nuestro caso el modelo usa la relación agua – vidrio, por lo que el ángulo de contacto es igual a cero.

c) Densidad del Fluido

El agua es líquido utilizado en los modelos y su densidad es de 1000 Kg/m³.

d) Aceleración debido a la Gravedad

La aceleración debida a la gravedad es de 9.81 m/s².

e) Radio del tubo

Radio del tubo Pitot: d = 5 mm o 6 mm. Pueden ser utilizados los dos tipos por lo que eso se determinara en el momento del ensayo.

f) Corrección

La altura de corrección por el fenómeno de capilaridad se dará en función de la tensión superficial y del diámetro del tubo Pitot.

$$h_c = 0.0002 \times \frac{\gamma}{d}$$

4.4.3.2 Calibración del Tubo Pitot

Para la calibración del instrumento, se calculo la altura por capilaridad en los diferentes tubos y a probarlos en el líquido del modelo (agua) para comprobar los resultados

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Cálculos de Corrección por Capilaridad (tubo 6mm)			
Γ	73,40415	N/m	h= $2\gamma\cos\theta$
D	6,0	Mm	
Θ	0	Grados	h= 0.14681
P	1000	Kg/m ³	29.43
G	9.81	m/s ²	h= 0.50 cm
R	0.003	M	

Cálculos de Corrección por Capilaridad (tubo 5mm)			
Γ	73,404150	N/m	h= $2\gamma\cos\theta$
D	5,0	Mm	
Θ	0	Grados	h= 0.14681
P	1000	Kg/m ³	24.525
G	9.81	m/s ²	h= 0.60 cm
R	0.0025	M	

A continuación se presentan los resultados:

Una vez que se introduce el tubo Pitot de diámetro interno 6mm en el agua la altura que se dio por capilaridad fue de 6mm. Lo cual quedo demostrado según se muestra en las fotografías.



Por este motivo queda comprobado que la corrección por capilaridad será calculada como se propuesto anteriormente.

$$h_c = 0.0002 \times \frac{\gamma}{d}$$

4.4.4. Tanque para almacenar el agua de Recirculación

El modelo debe tener un sistema de recirculación, el que a su vez debe tener una cantidad de agua para su funcionamiento. Este volumen de fluido esta distribuido en distintas partes del modelo:

- a) Tanque de Reserva
- b) Tanque de demasías
- c) Mangueras de ingreso
- d) Tuberías

Con esta cantidad de agua se logra un óptimo funcionamiento del sistema y se salvaguarda la vida útil de las bombas, ya que estas permanecen cebadas.

Descripción	Largo[m]	Ancho [m]	Altura[m]	Volumen[m ³]
Tanques de Reservas	0.5	0.37	0.3	0.111
Tanque de Demasías	0.2	0.162	0.37	0.01198
			TOTAL	0.123

Descripción	Largo[m]	Diámetro [cm]	Cantidad	Volumen[m ³]
Mangueras de Ingreso	4.36	2.54		2.21e-3
Tuberías	1.4	2.54		7.09e-4
			TOTAL	3.63 e-3

Gran total= 0.126 m³

Este volumen es el mínimo por el cual se puede operar este modelo sin inconvenientes. Para evitar daños posteriores se recomienda utilizar este nivel de agua o un poco mayor.

4.5 Instalaciones Auxiliares

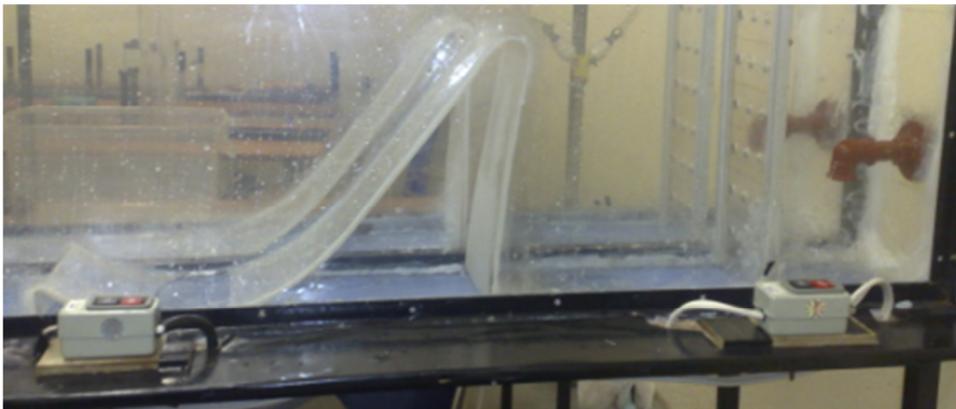
Dado que después de cada ensayo el agua queda acumulada es necesaria la utilización de accesorios P.V.C para desaguar el sistema.



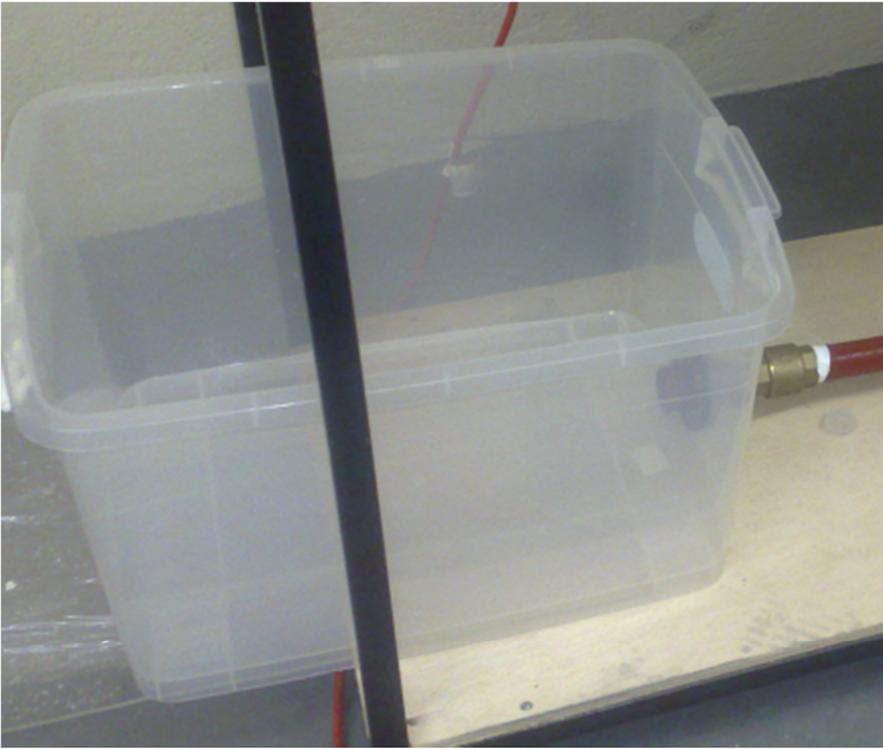




Solo mediante el uso de botoneras nos es posible el correcto encendido y apagado de las bombas.



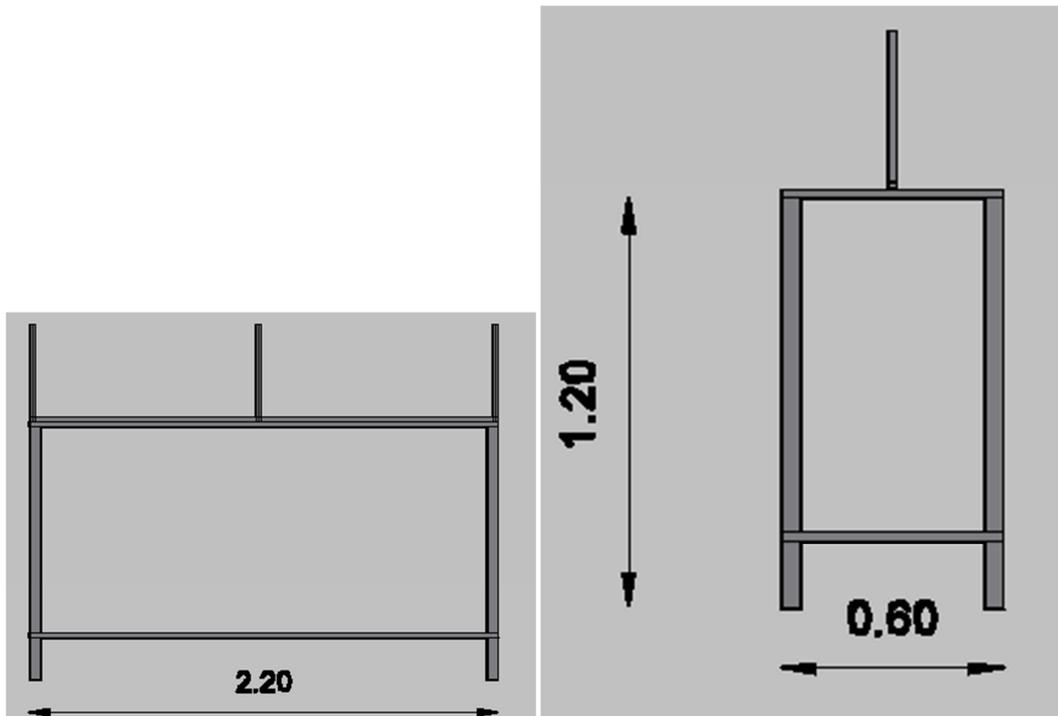
Al final del modelo se colocó un canal captador del agua saliente del sistema que conduce la misma al tanque de recirculación por medio de dos mangueras de dos pulgadas de diámetro.



4.6 Detalle Constructivo

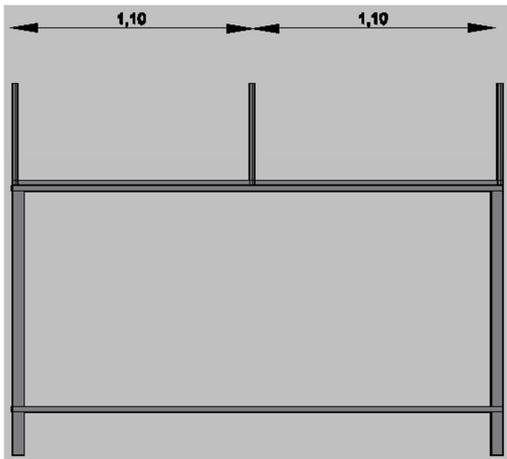
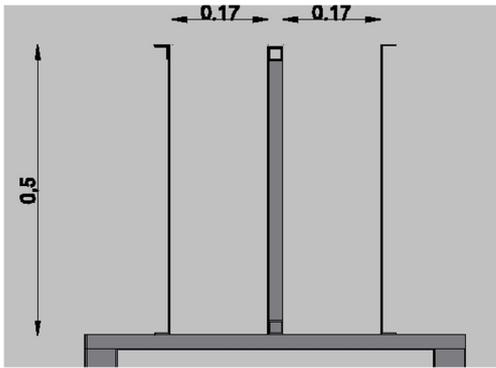
4.6.1. Detalle de la Estructura Metálica Exterior

Uso de tubo metálico de acero cuadrado con espesor de 2.5mm. para la conformación de la mesa

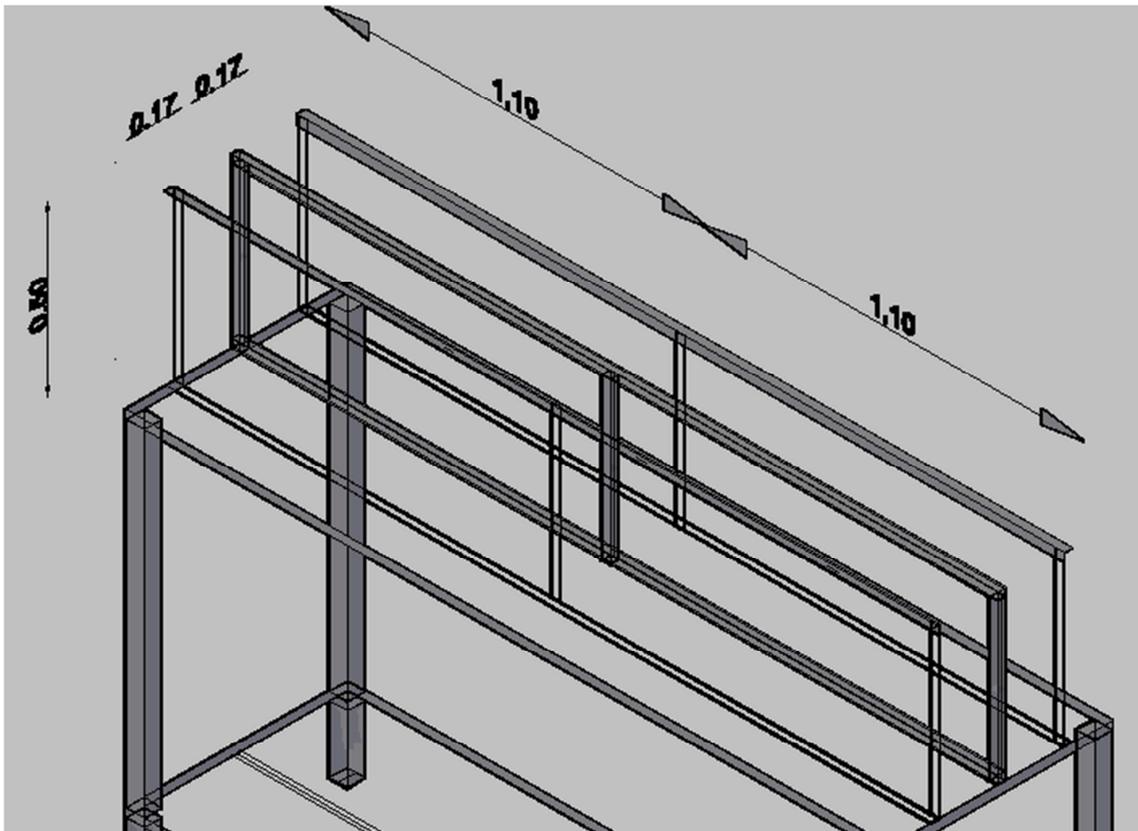


4.6.2. Detalle de Estructura Metálica Interior

Para estabilización y soporte de canales internos se hizo uso de un perfil similar que el utilizado para la estructura metálica exterior.



Se tuvo que modificar los perfiles ya que no se logro la rigidez adecuada y se coloco un perfil adicional en el extremo de los anteriores. Mediante este paso se pudo sujetar los acrílicos de una forma más consistente y pueda soportar las presiones generadas por el agua.



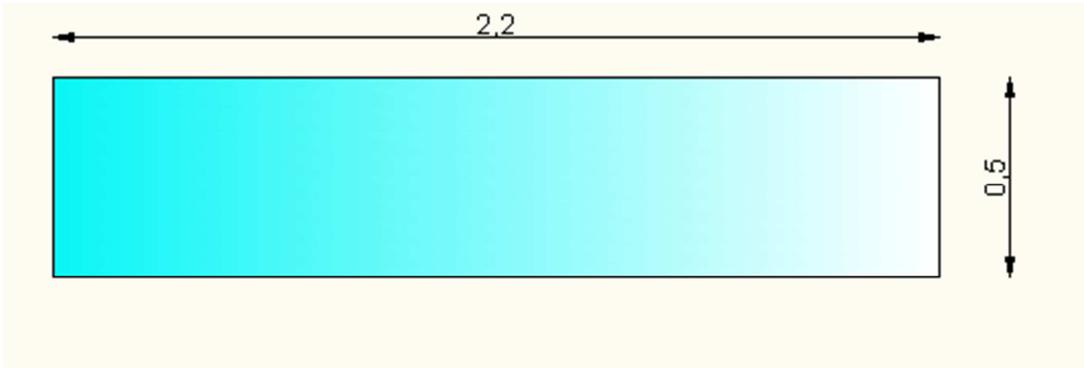
4.6.3 Detalle de Paredes de Acrílico

Se usaron cuatro piezas para conformar las paredes de acrílico con las siguientes medidas:

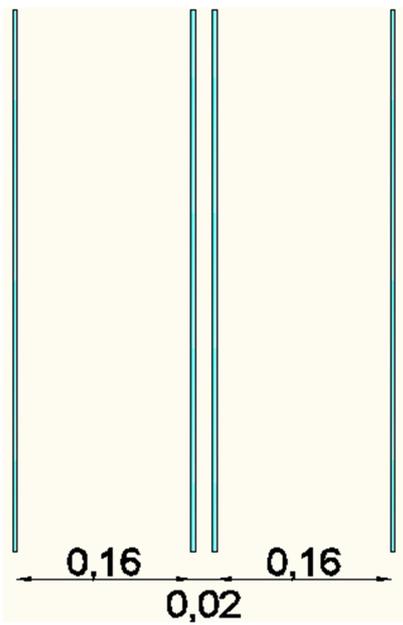
Altura: 0.5 m

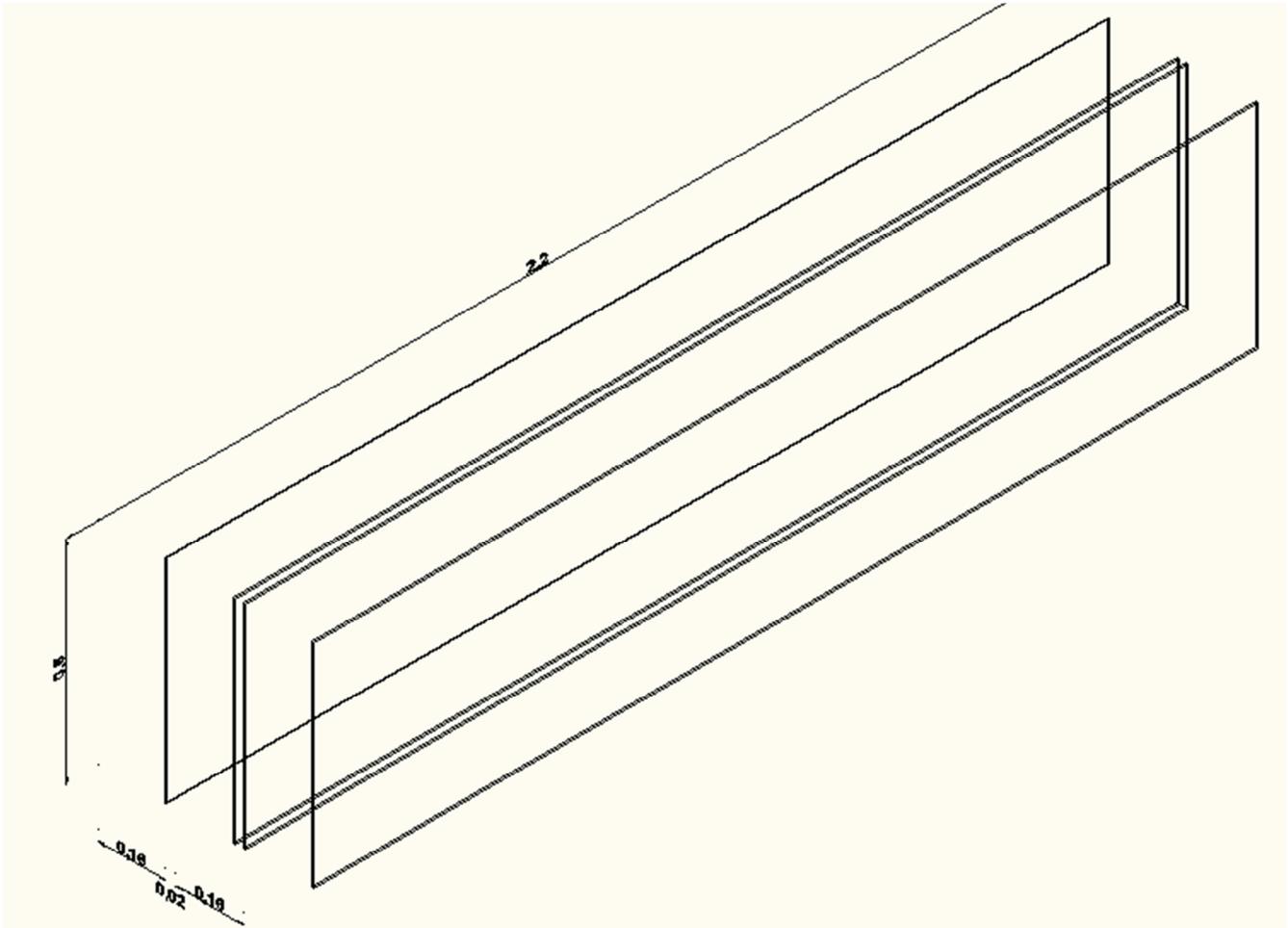
Largo: 2.2 m

Espesor: 4 mm



Con estas cuatro piezas se conformaron los dos canales de 17 cm de ancho



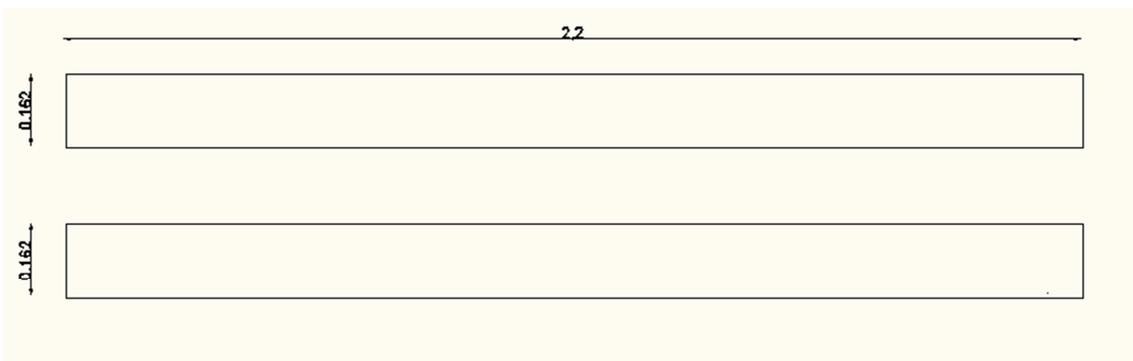


Para obtener el Tanque de Demasías se colocó en el fondo de cada canal dos piezas de acrílico, respectivamente, con las siguientes medidas:

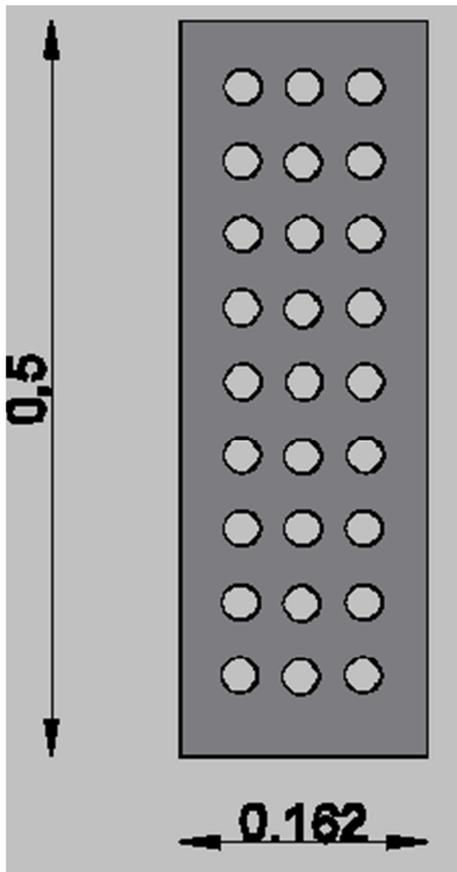
Ancho: 16.2 cm

Largo: 2.2 m

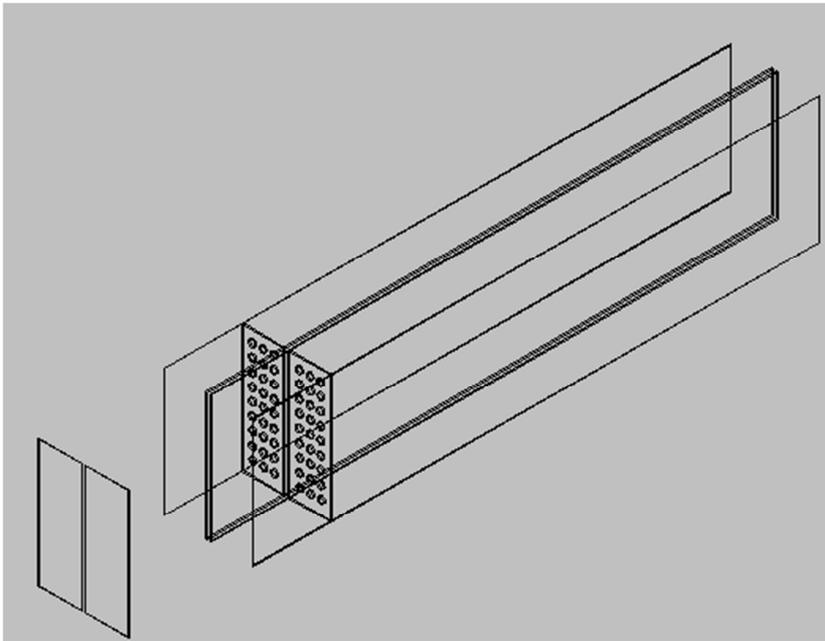
Espesor: 4 mm



Para estabilizar el flujo se colocaron dos paredes agujeradas con 27 agujeros de 2.54 cm de diámetro y espaciados entre si, horizontalmente 3 cm desde su borde y verticalmente 2 cm desde su borde.



Al final se consiguió un modelo como se muestra en la siguiente figura



4.6.4 Detalle de Vertedero de Pared Gruesa

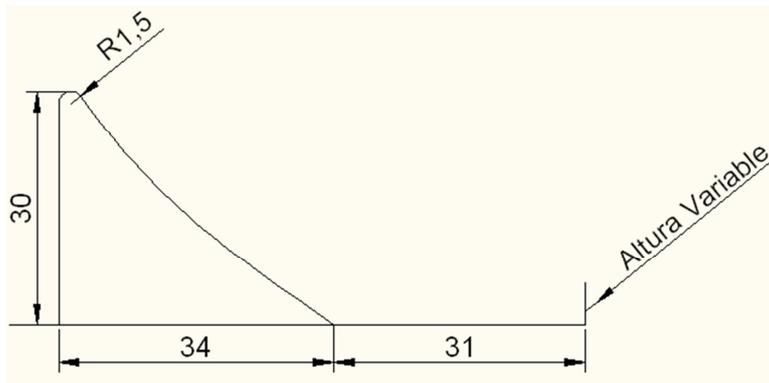
El modelo consta de dos vertederos uno de 45 grados y otro de 60 grados de pendiente.

Ambos vertederos fueron elaborados por una persona especializada, la cual utilizó plantillas para la forma requerida al acrílico.

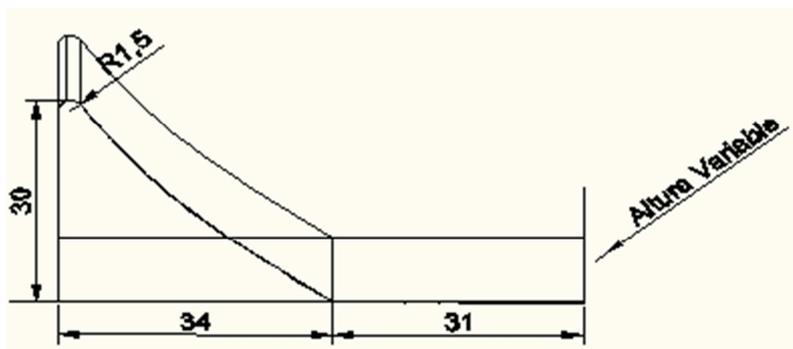
4.6.4.1 Detalle de Vertedero de 45 grados con Disipador USBR

Tipo II

Según el diseño ya mencionado se envió a fabricar el azud el cual consta de las siguientes medidas:



El dissipador USBR Tipo II se puede colocar en la parte inferior del vertedero



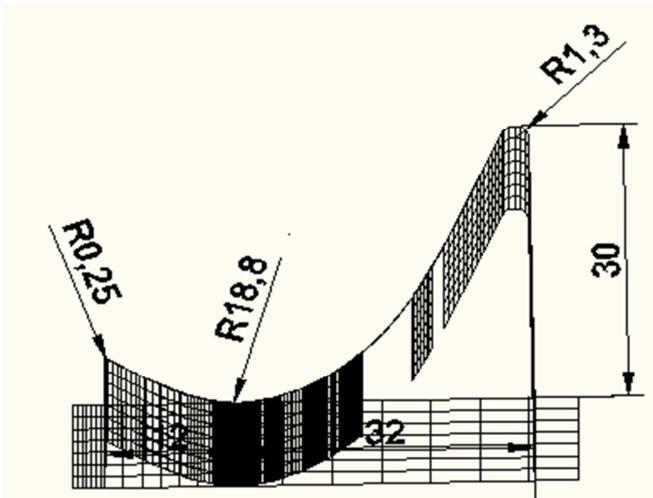
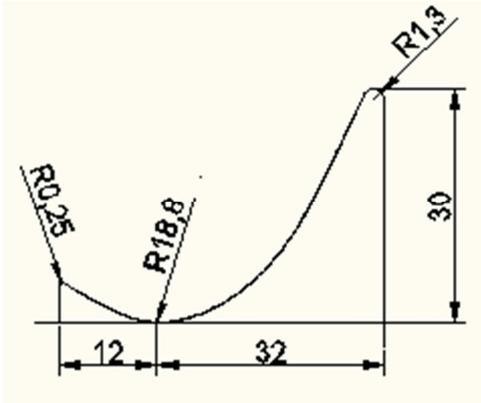
Las medidas exactas no se pudieron dar a las piezas dado a que son muy pequeñas y se encuentran fuera del alcance del corte del laser así como también de la ductilidad del espesor de la lámina de acrílico.

4.6.4.2 Detalle del Vertedero de 60 grados con Disipador Tipo Esquí

Dicho vertedero forma un solo conjunto con el disipador tipo esquí, el mismo que fuera fabricado de manera artesanal.

4.6.5 Detalle del Modelo completo

Al finalizar el trabajo el modelo queda conformado de la siguiente manera sin tomar en cuenta el sistema de recirculación.



Cabe recalcar que las medidas de tuberías y accesorios fueron las requeridas por el modelo.

4.7. Análisis de Costos

A continuación se presenta un desglose de la totalidad de materiales utilizados en la construcción del modelo sin tener en cuenta desperdicios y otros accesorios necesarios para la implementación del mismo.

	Material	Medida	Cantidad	PU	IVA	Total
Mesa	Angulo de hierro	1" x 1/8"	4		12%	
	Tubo NGR	1" x 1.2mm x 1.8"	2		12%	
	Madera	17.2 m ²	2		12%	
	Juego de Pernos y tuercas	40	40		12%	
	Suelda	4m	4m		12%	
				Total mesa terminada		120
Sistema de Recirculacion	Abrazaderas anchas	1"	10	0,9	12%	10,08
	Adaptador P/ tanque PVC	1"	4	2,5	12%	11,2
	Neplo Flex alargado	1"	2	1,5	12%	3,36
	Valvula Bola	1"	2	3,6	12%	8,064
	Bomba de Succion	0.5 HP	2	65,5	12%	146,72
	Cams. Botonera 15 Amp.	u	2	4,75	12%	10,64
	Cable de luz	m	10	1,5	12%	16,8
	Enchufe	u	2	1,5	12%	3,36
	Tanque de circulacion	u	2	30	12%	67,2
	Manguera transparente	m	26	0,7	12%	20,384
	Manguera negra	m	4	0,45	12%	2,016
				Suma		299,824
Acrilico	Lamina 125 x 244 cm transparent	u	2	75	12%	168
	Lamina 16,2 x 50 cm transparent	u	2	6,5	12%	14,56
Juego de Pernos	Perno Allen (rodela + tuerca)	1,5" x 0,25"	100	0,2	12%	22,4
				Suma		204,96
Varios	Figuracion de Piezas de acrilico	u	2	50	12%	112
	Corte de acrilico	m	7	1,5	12%	11,76
	Papel Adhesivo Contac	3 m x 45	5	3,45	12%	19,32
	Juego de Broca	u	1	15,2	12%	17,024
	Aplicador de silicon (Pistola)	u	1	3,15	12%	3,528
	Sikasil E Transparente	300 ml.	12	3,55	12%	47,712
	Tubos Pitot	u	5	15	12%	84
				Suma		295,344
			Total	920,128		

CAPITULO V

FUNDAMENTOS TEORICOS DE DISIPADORES

5.1. Fórmulas Propuestas por el U.S. Bureau of Reclamation para el diseño de Vertederos⁹

Azud:

Caudal: $Q = c.Lv.Hd^{3/2}$

Velocidad de Aproximación: $Va = \frac{Q/L}{p+Hd}$

Altura de Velocidad: $ha = Va^2 / 2g$

Geometría de la Cresta: $Xn = K.Hd^{n-1}.Y$

$$X^{1.85} = 2.Hd^{0.85}.Y$$

Cuenca Disipador Bureau of Reclamation II

Numero de Froude: $F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g.Y_1}}$

Profundidad de Salida Y₂: $\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)$

Bloque de Rápida:

Separación $S_1 = Y_1$

Altura $h_1 = Y_1$

Espesor $W_1 = Y_1$

⁹Ven Te Chow "Hidráulica de Canales Abiertos" caps. 14-15 págs. 352-412

Umbral Dentado

Separación	$S_2 = 0.15D_2$
Altura	$h_2 = 0.2D_2$
Espesor	$W_2 = 0.15D_2$
Diente Horizontal	$0.02D_2$
Pendiente	2:1

5.2. Análisis del Resalto Hidráulico

Como consecuencia del retardo sufrido por la corriente de agua que fluye a gran velocidad en un canal abierto, se presenta un ascenso brusco del nivel de agua, el mismo que es llamado resalto hidráulico.

El estado de fuerzas que se presenta en este fenómeno, es un estado de fuerzas en equilibrio en donde existe un cambio violento del régimen de flujo, pasando de un estado supercrítico a uno subcrítico.

Este cambio de régimen de flujo implica una cuantía de pérdida de energía relativamente grande, disipada en el cuerpo turbulento de agua dentro del resalto. Se aprecia, un contenido de energía, en el flujo después del resalto, notablemente menor que el existente con anterioridad. Las investigaciones realizadas por el Bureau of Reclamation a cerca de diferentes tipos de resaltos hidráulicos en canales horizontales tienen como base de clasificación el número de Froude F_1 :¹⁰

¹⁰U.S. Bureau of Reclamation "Diseño de Presas Pequeñas" Capítulo 8 pág. 322

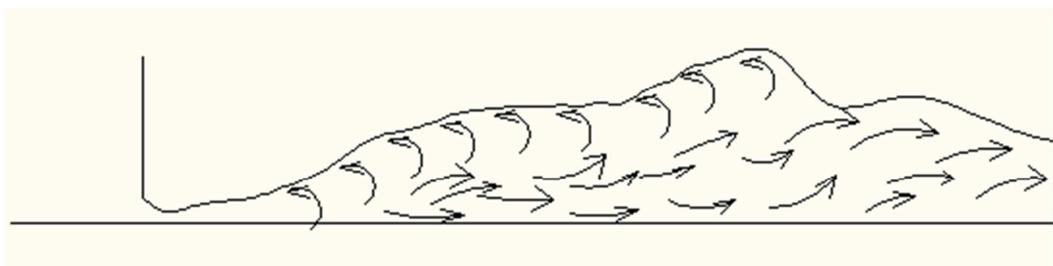
- a) $F_1 = 1$: Para flujos críticos (a causa de esto no se forma resalto alguno.)
- b) $1 < F_1 < 1.7$: Ondulaciones visibles en las superficies del agua (salto ondular)
- c) $1.7 < F_1 < 2.5$: Salto débil. Pequeños rollos formados a lo largo del salto. Superficie lisa aguas abajo del salto. Pérdida de energía relativamente baja.



F_1 entre 1.7 y 2.5

Forma A – Régimen antes del resalto

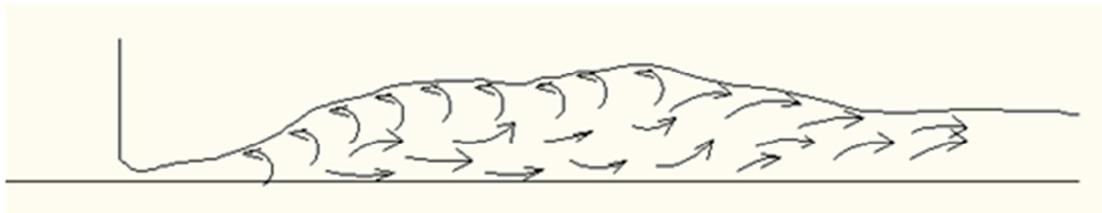
- d) $2.5 < F_1 < 4.5$: Salto oscilante. En dirección fondo – superficie se produce un chorro oscilante sin periodicidad. En cada oscilación una gran onda de periodo irregular es producida, la misma que puede recorrer varios kilómetros aguas abajo dañando bancos de arena y márgenes.



F_1 entre 2.5 y 4.5

Régimen de transición

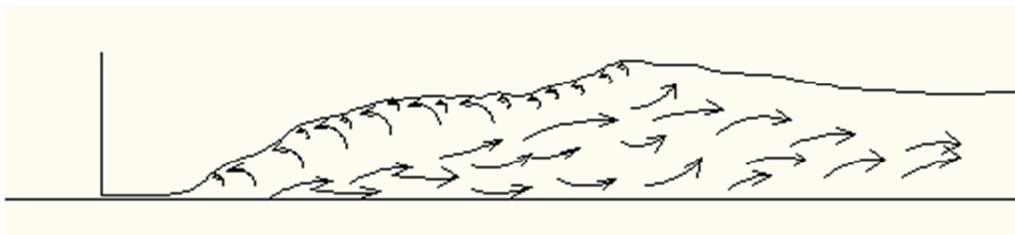
- e) $4.5 < F_1 < 9$: Salto permanente. Aguas abajo la extremidad del rollo de la superficie ocurre prácticamente en la misma sección vertical en que el punto en el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo. La sensibilidad de la variación de la profundidad aguas abajo es menor en cuanto acción y posición de este salto. El salto se encuentra balanceado y el rendimiento en la disipación de energía varía entre 45 y 70%.



F1 entre 4.5 y 9

Forma C – Zona de Resaltos Bien Balanceados

- f) $F_1 > 9$: Salto fuerte. Paquetes de agua intermitente corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto. Al chocar el chorro de alta velocidad con estos paquetes, se generan ondas en dirección aguas abajo. Puede prevalecer una superficie áspera. La acción del resalto puede alcanzar un 85% de rendimiento siendo evidentemente brusca pero efectiva.



F1 Mayor que 9. Forma D – Resalto Efectivo pero con una Superficie muy irregular aguas abajo.

Es recomendable mantener el resalto hidráulico en una condición de resalto estable, debido a que esta condición de resalto contiene un resalto bien formado y su accesibilidad en condiciones de flujos reales es alta, a pesar que la disipación no llega a alcanzar los mejores niveles. Cuando se trata de resaltos permanentes o fuertes las condiciones hidráulicas a cumplir en la práctica son muy exigentes y difíciles de alcanzar.

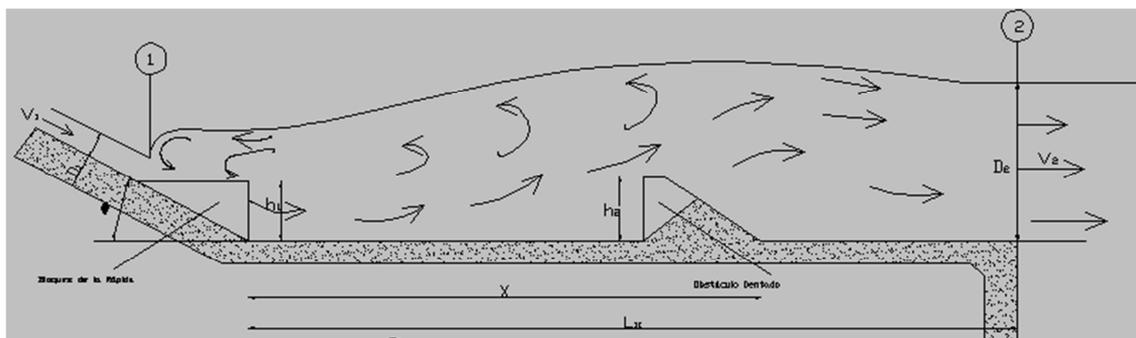
5.3 Tipos de Cuencos de Disipación

Una vez estudiados los fenómenos hidráulicos mediante los cuales se lograra disipar la energía excedente respecto de la restitución, nos es necesario definir tanto forma como dimensiones de la estructura que contendrá esta energía excedente.

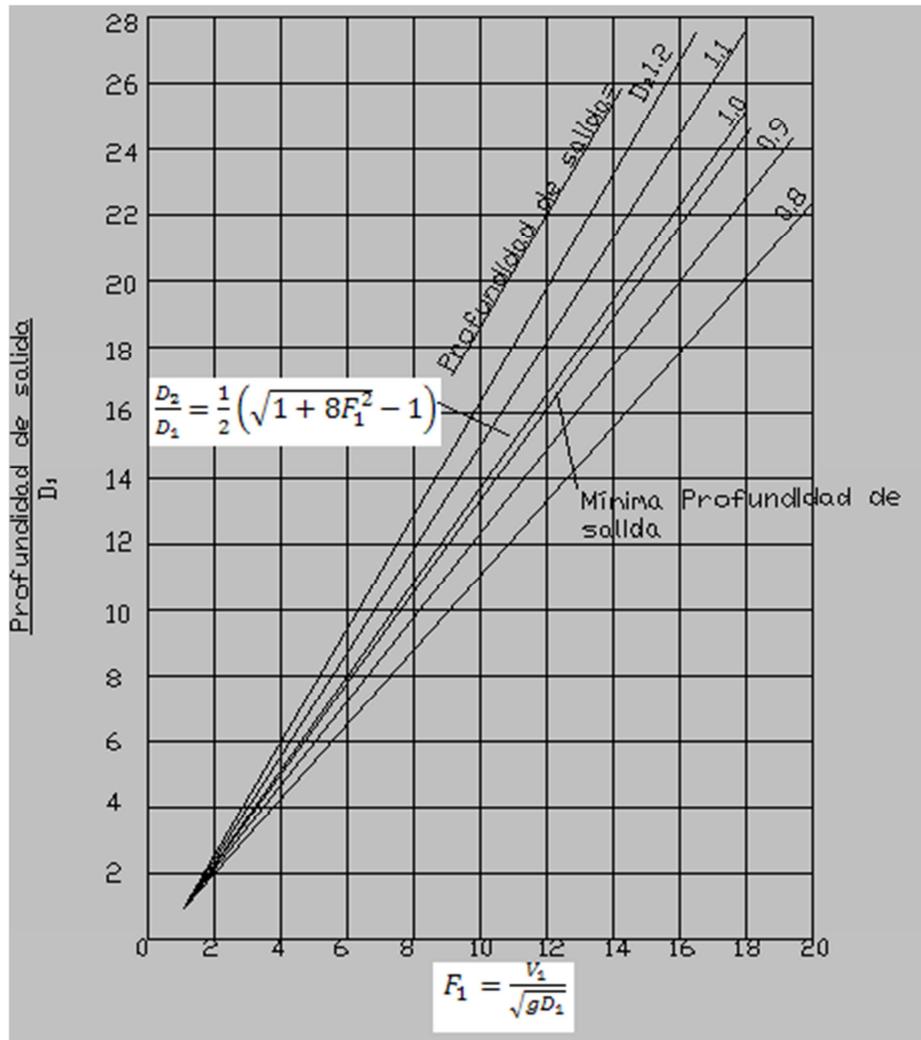
Se entiende por disipación a la transformación de la energía hidráulica en otras formas de energía, como son el calor y el sonido que en este caso no nos son de mayor significado. Según sus orígenes latinos esta palabra tiene por significado *aniquilar o desparramar*. A pesar que se sabe que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma, se podría decir que esta energía se pierde dado que el resultado de su transformación deja de tener utilidad, que es justamente el objetivo de estos cuencos amortiguadores. Este tipo de cuencos amortiguadores son únicamente una de las variadas estructuras de disipación de energía hidráulica.

5.3.1 Cuenco Disipador Bureau of Reclamation II

El USBR fue desarrollado con el fin de utilizarlo para cuencos disipadores en vertederos de presas altas, presas de tierra y para estructuras de canales grandes. En la rápida del extremo aguas arriba el cuenco consta de bloques; y en las cercanías del extremo de aguas abajo contiene un umbral dentado. Los bloques de impacto no son utilizados, ya que dadas las altas velocidades que entran al resalto, se puede producir cavitación en dichos bloques.



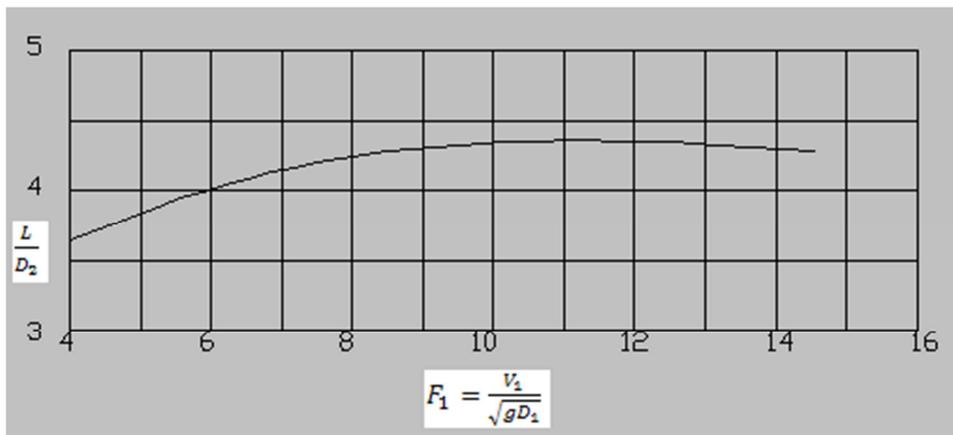
La profundidad antes del resalto (Profundidad Inicial D_1) es siempre menor que la profundidad después del mismo (Profundidad Secuente D_2).



Las reglas recomendadas para el diseño, son las siguientes:¹¹

1. Se debe fijar la elevación del piso para utilizar la profundidad secuente D_2 de aguas abajo, y adicionalmente se aumenta un factor de seguridad. Las líneas anteriores sirven para relacionar la profundidad real aguas abajo con la la profundidad secuente. Algunos estudios existentes indican que la mayoría de cuencos fueron diseñados para profundidades de salida secuentes o menores. A pesar de esto, hay un límite notado por la línea llamada mínima profundidad de salida, que nos muestra el punto para el cual el frente del resalto se mueve hacia afuera de los bloques de la rápida. Es decir que cualquier reducción adicional de la profundidad de salida desencadenara una salida del resalto fuera del cuenco(barrido de resalto). El cuenco no tiene que diseñarse con profundidades menores que la secuente D_2 . Es recomendado por el U.S. Bureau of Reclamation un margen de seguridad mínimo del 5% de D_2 , el mismo que se sumará a la profundidad secuente D_2 .
2. Para valores número de Froude < 4 , es recomendable diseños que consideren la supresión de ondas. El cuenco disipador USBR II puede ser efectivo solo hasta este número de Froude.
3. La longitud del cuenco se puede obtener de la curva de longitud del resalto postulada en el siguiente gráfico:¹²

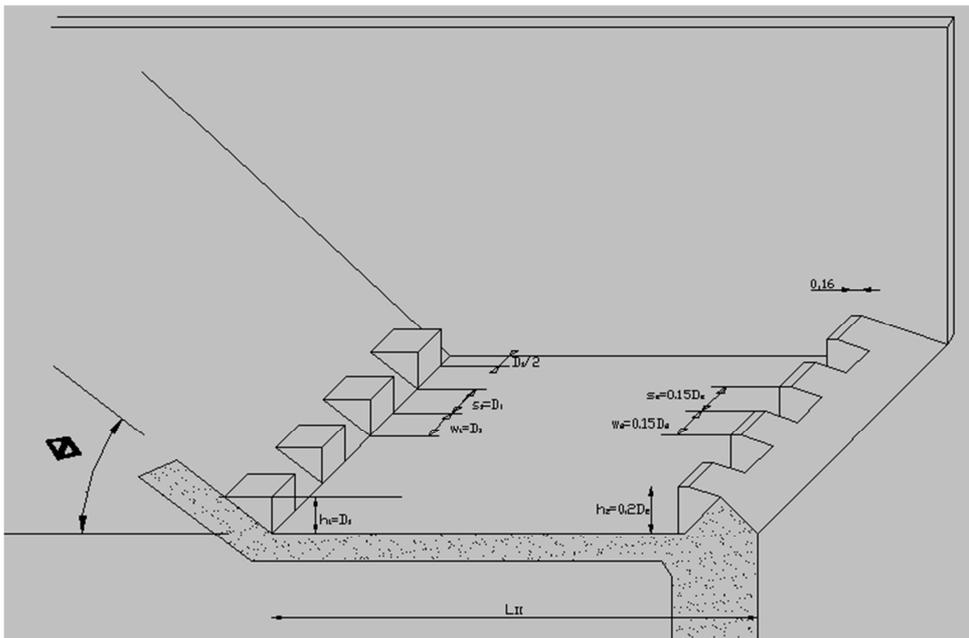
¹¹⁻¹² Ven Te Chow, "Hidráulica de Canales Abiertos", en los capítulos 13-15, págs. 408- 411



4. La altura de los bloques de la rápida es igual a la profundidad D_1 del flujo que entra al cuenco. El ancho y espaciamiento deben ser aproximadamente D_1 , pero esto puede modificarse para eliminar la necesidad de fracciones de bloques, por lo que normalmente se utiliza la misma medida de D_1 . El espaciamiento entre paredes laterales y bloques de la rápida extremos, es recomendable dejar una medida igual a $0.5D_1$, para evitar salpicaduras y mantener las presiones adecuadas.
5. Con respecto al umbral dentado a continuación se presentan las medidas:

- a) Altura de umbral dentado: $0.2 D_2$
- b) Ancho y espaciamientos máximos: $0.15D_2$
(es recomendable colocar un bloque adyacente a cada pared lateral)
- c) Pendiente de parte continua del umbral de salida: 2:1
(En cuencos angostos, involucraría solo algunos dientes por la regla anterior, se recomienda reducir ancho y espaciamiento de manera proporcional, cuya reducción mejora el comportamiento en estos cuencos. Los anchos y

espaciamientos mínimos entre dientes toman consideraciones únicamente estructurales.)



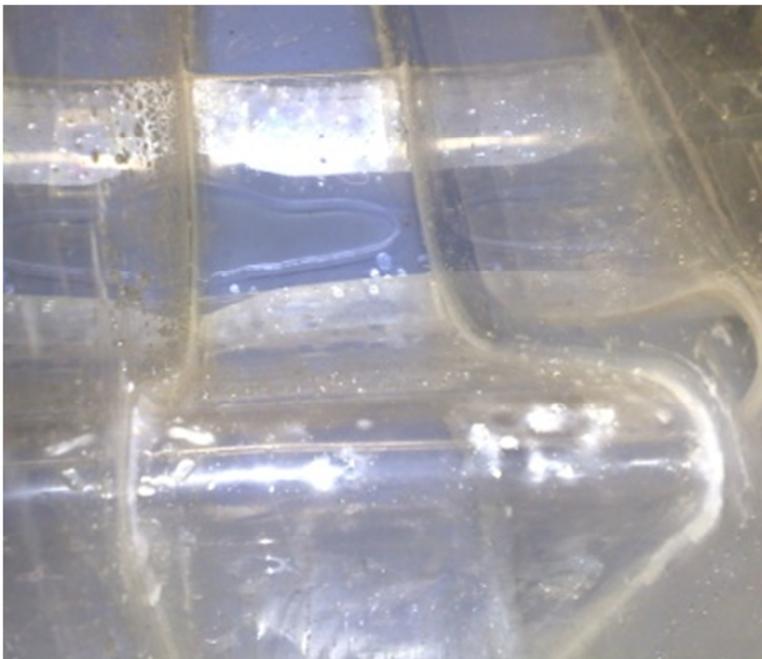
6. Ni desde el punto de vista constructivo ni desde el punto del modelamiento no es necesario ni recomendable escalonar los bloques de la rápida y el umbral dentado.
7. Los experimentos realizados sobre estos cuencos no nos muestran cambio perceptible en la acción del cuenco disipador con respecto a la pendiente de la rápida, aguas arriba del cuenco. Se usaron como pendientes de la rápida desde 0.6: 1 a 2 : 1. Cuando la pendiente de la rápida es 1:1 o mayor es recomendable colocar una curva con $R=4D_1$ en la intersección entre la rápida y el cuenco. En el caso de incorporar la sección curva, los bloques no tienen ningún tipo de inconveniente para acoplarse a la misma. Cuando se trata de rápidas empinadas la longitud de la superficie superior de los bloques se hace lo suficientemente larga como para deflectar el chorro.

5.3.2 Vertedero en Salto de Esquí:

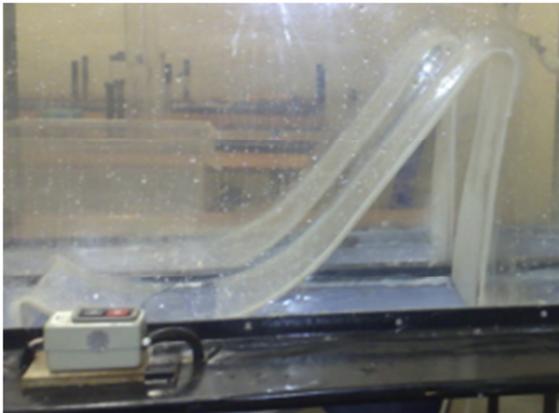
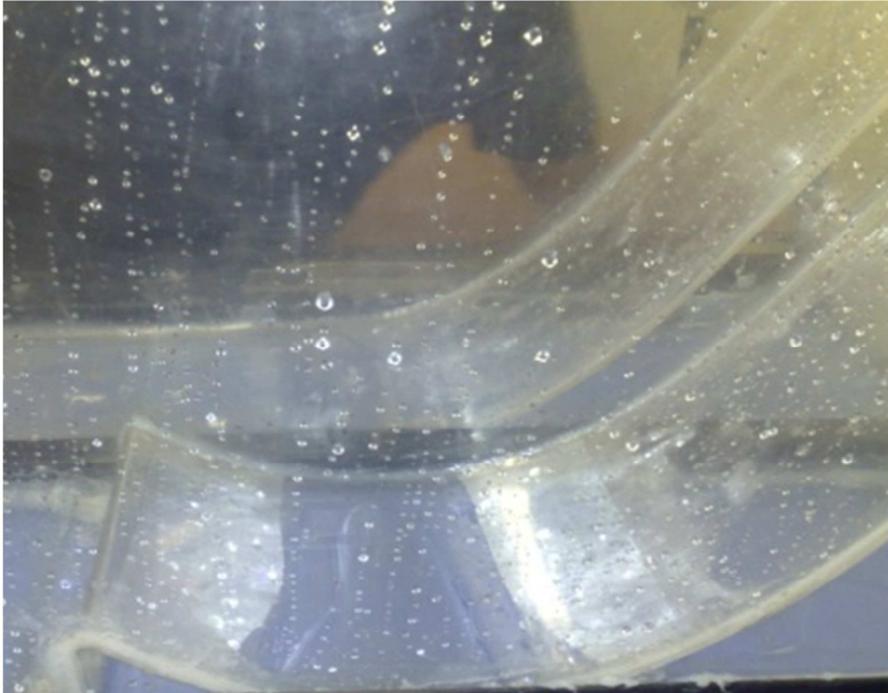
Es usado cuando existen grandes descargas, principalmente en los vertederos que descargan sobre lechos rocosos. Se usa trampolines para hacer saltar el flujo hacia un punto aguas abajo, con el fin de reducir la erosión en el cauce y en el pie de la presa. La trayectoria del chorro depende de:

- a) La descarga
- b) Su energía en el extremo inferior
- c) Del ángulo con el que sale del trampolín.

La salida es diseñada en forma de un labio grande especial o cubeta, la misma que lanza el chorro completo del flujo al aire. Una parte de la energía del chorro es disipada en el aire, y cae a una distancia prudente lejos de la presa. Este diseño fue propuesto por primera vez por Coyne¹³.



¹³www.revistabit.cl/body_articulo.asp?ID_Articulo=1517

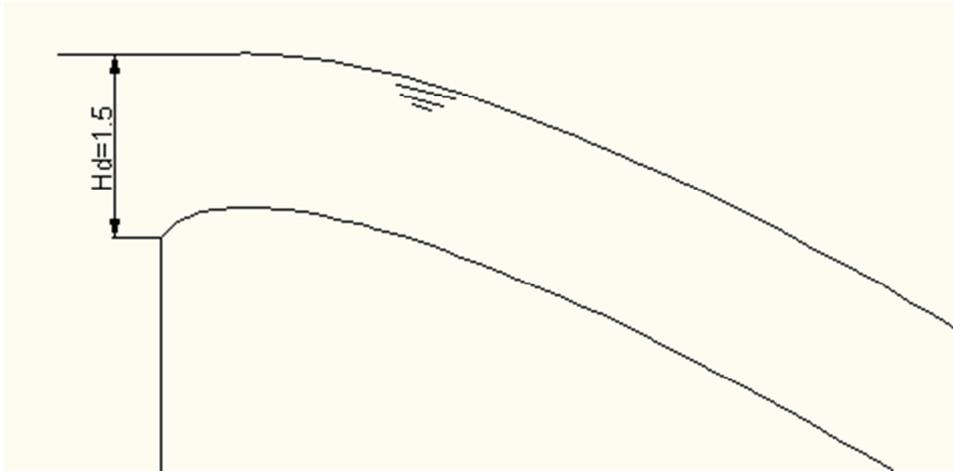


En la figura se muestra un salto común de esquí. La placa del fondo es reforzada en extremo en este diseño, debido a las grandes cargas generadas por la presión centrífuga del chorro que actúa a la salida del vertedero.

5.4 Comprobación de las Fórmulas Teóricas en el Modelo

5.4.1 Altura de Diseño (Hd)

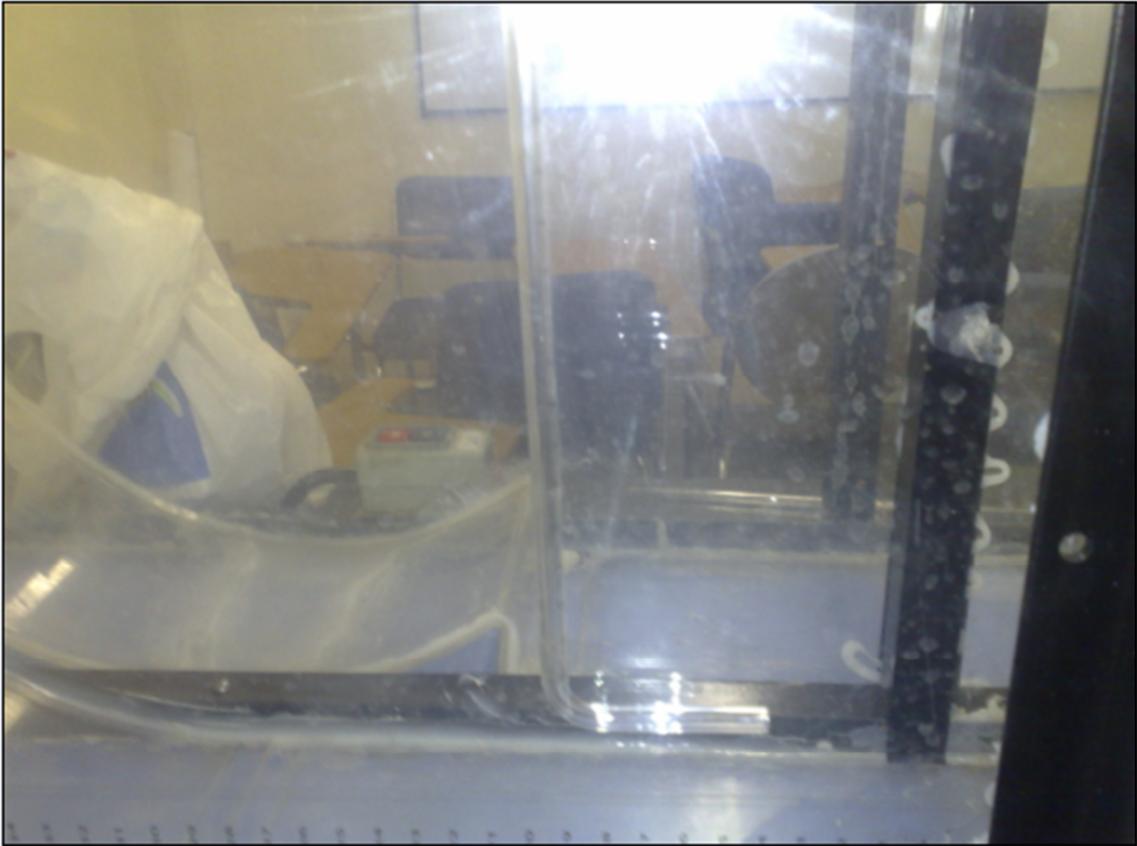
La altura de diseño en el vertedero se comprobó usando un flexómetro como herramienta de medición durante las prácticas.



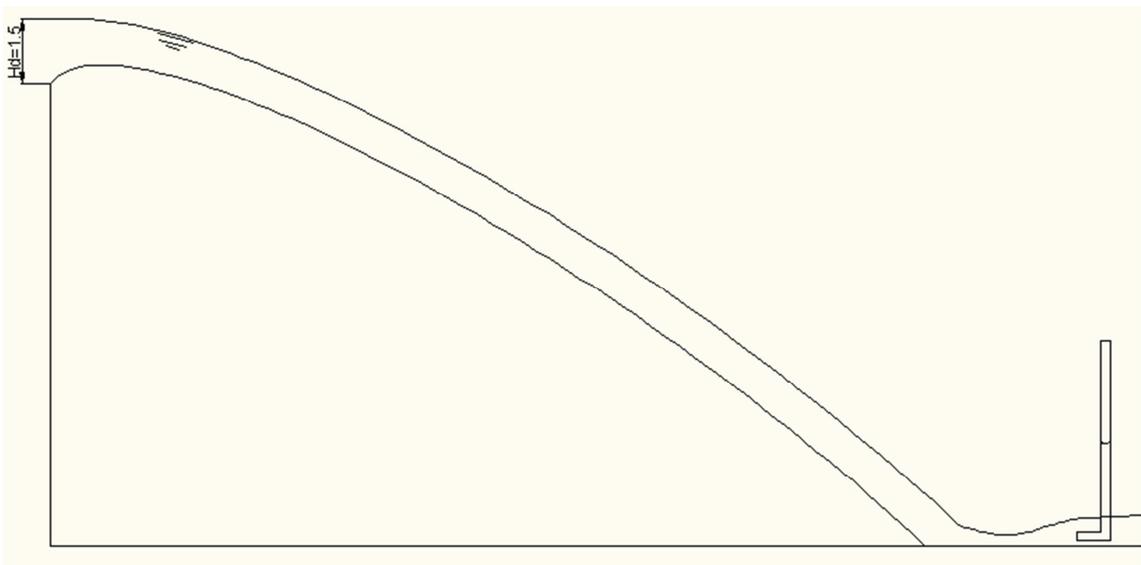
El valor obtenido en el modelo es de 1.5 cm.

5.4.2 Velocidad de Aproximación

Esta velocidad es obtenida mediante la utilización del tubo Pitot, el cual da la carga de velocidad medida en centímetros. Las siguientes fueron las lecturas obtenidas:



La media de estos valores es 0.0140 m/s



A esta medida se le debe restar la altura por efecto de capilaridad = 0.6 cm para tubos delgado, por lo que la medida real será de: 0.0137 m/s

Como paso final se usa la formula de carga de velocidad $V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ y se obtiene una velocidad de 0.054 m/s, la misma que se considera como despreciable y que fue cercana al valor calculado de 0.0134 m/s la cual también es despreciable.

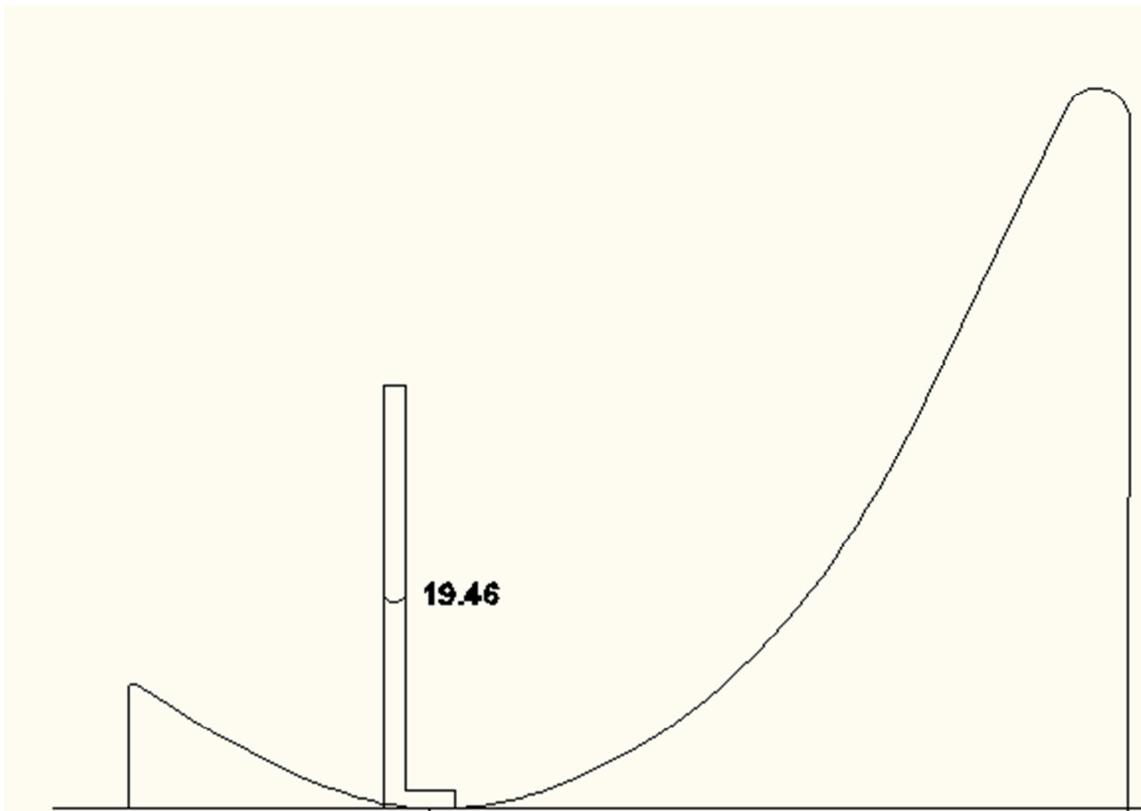
5.4.3 Velocidad de Salida en el Vertedero (V_1)

Se la obtuvo midiendo la carga de velocidad, la cual se la obtuvo de la lectura del tubo Pitot de 6mm de diámetro.

Las medidas obtenidas en el vertedero de 60° con disipador de energía tipo esquí fueron de:

- a) 19.5 cm
- b) 20.8 cm
- c) 18.1 cm

La media de las mismas es: 19.46 cm y el valor corregido por capilaridad es de 18.86 cm.



Este valor arroja una velocidad de 0.054 m/s, mismo que se aproxima al calculado 0.0134 m/s

Las medidas obtenidas en el vertedero de 45 ° con disipador USBR tipo II son las mismas ya que se uso el mismo caudal y los modelos únicamente cambian en el tipo de disipador.

5.4.4 Número de Froude (F_1)

Al número de Froude se lo obtuvo dado la relación que este tiene con la velocidad y la velocidad se la obtuvo con la ayuda de los tubos Pitot.

La velocidad de entrada del disipador pasa a ser la misma que la velocidad de salida del vertedero e igual a 0.0134 m/s.

Con esta velocidad se obtiene un número de Froude de 3.8, con lo que se asegura la utilización del disipador USBR II.

CAPITULO VI

REALIZACION DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO

6.1 Instrucciones para la utilización del Modelo

1. Verificación de válvulas: todas las válvulas de ben estar cerradas.
2. Llenado de Tanque: se llena el tanque de almacenamiento entre el nivel máximo y el nivel mínimo.







Canal A

1. Abrir válvula 1 A
2. Encender una botonera, para el caso de la práctica de esquí sumergido y las dos botoneras para el caso de esquí normal.
3. Esperar una media de 30 segundos hasta que el flujo se estabilice.
4. Tomar las medidas y realizar las practicas.

Canal B

1. Abrir válvula 1 B
2. Encender botoneras
3. Esperar una media de 30 segundos hasta que el flujo se estabilice.
4. Tomar las medidas y realizar las practicas.

- Una vez finalizada la practica se apaga la bomba y se cierran las válvulas 1A y 1B respectivamente, de lo contrario se derramara el agua del tanque de reserva
- Se descarga el agua del tanque de demasías con las válvulas de desagüe 2A, 2B, 3 y 4.

6.2 Desarrollo de las Prácticas

6.2.1 Practica # 1.- Vertedero en Salto de Esquí Simple.

a) Objetivo

1.- Mediante la utilización del tubo Pitot se determinarán las velocidades en el modelo y se determinará la disipación de energía.

2.- En el vertedero en salto de esquí simple, como sumergido, se tomaran diferentes mediciones en puntos ya marcados en el vertedero para mediante los mismos determinar los cambios de velocidad que se producen en el trayecto del flujo y así determinar la energía disipada en este modelo.

b) Introducción

La utilización del vertedero en salto de Esquí esta dada para grandes descargas realizadas directamente sobre lechos rocosos de ríos.

Para realizar las descargas se emplean unos trampolines que hacen saltar el flujo hasta un punto, aguas abajo, en donde la erosión en el cauce y pie de la represa se va a reducir. La trayectoria del flujo depende de tres factores especialmente:

- a) Descarga
- b) Energía en el extremo
- c) Angulo de salida del trampolín

La salida es diseñada en forma de un labio grande especial o cubeta, la misma que lanza al chorro completo hacia el aire, pero cayendo nuevamente al río a una cierta distancia.

c) Equipo

- Tubo Pitot
- Flexómetro
- Termómetro

d) Procedimiento

- 1.- Se realiza las instrucciones para la utilización del modelo.
- 2.- Se toma las medidas de carga de velocidad mediante la utilización del tubo Pitot en los puntos marcados en el vertedero.(pág 90)

3.- Determinación de la tensión superficial mediante el cuadro 1, y la utilización del termómetro para conocer la temperatura del agua.

4.- Mediante la formula de corrección por capilaridad de la Ley de Jurin, se realiza la corrección correspondiente a la medida obtenida con la ayuda del tubo Pitot. ($h - h_c$).

5.- Determinar la diferencia de velocidades entre los puntos 3 y 4 en el vertedero.

6.- Determinación del porcentaje de disipación.

e) Cuadros y Fórmulas

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

$$h_c = 0.0002 \times \frac{\gamma}{d}$$

CARGA DE VELOCIDAD

ALTURA POR CAPILARIDAD

LEY DE JURIN

CUADRO 1

Coefficiente de Tensión Superficial	
Temperatura °C	γ [N/m]x 10 ⁻³
0	75.64
10	74.22
20	72.75
30	71.18
40	69.56
50	67.91
60	66.20
100	58.90

6.2.2 Practica # 2.- Vertedero en Salto de Esquí Sumergido

a) Objetivo

1.- Mediante la utilización del tubo Pitot se determinarán las velocidades en el modelo y se determinará la disipación de energía.

2.- Observar los fenómenos producidos en el vertedero, así como en el resalto hidráulico y líneas de flujo producidas.

b) Introducción

La utilización del vertedero en salto de Esquí Sumergido consiste en dirigir la lámina con inclinación conveniente tal que ayude al resalto o evite la erosión aguas abajo; son ubicados al final del cuenco.

El uso de este tipo de estructura se da en función del suelo o roca que se encuentre a su alrededor, ya que una parte de la turbulencia se desarrolla en el cauce. En el salto de esquí sumergido se crean remolinos y en algunos casos se prescinde de un cuenco de disipación en su forma completa.

Funcionamiento Hidráulico: Formación de dos remolinos los cuales se mueven uno en dirección opuesta al otro. El primero se sitúa en la región superior del salto de Esquí curvo, y el segundo se ubica aguas abajo del esquí. La suma de los movimientos contrarios de los remolinos mas el agua de llegada, combinan sus efectos para disipar efectivamente la elevada energía del agua y evitar así la erosión del aguas abajo del salto de esquí.

c) Equipo

- Tubo Pitot
- Flexómetro
- Termómetro

d) Procedimiento

- 1.- Se realiza las instrucciones para la utilización del modelo.
- 2.- Se toma las medidas de carga de velocidad mediante la utilización del tubo Pitot en los puntos marcados en el vertedero.(pág. 93)
- 3.- Determinación de la tensión superficial mediante el cuadro 1, y la utilización del termómetro para conocer la temperatura del agua.
- 4.- Mediante la formula de corrección por capilaridad de la Ley de Jurin, se realiza la corrección correspondiente a la medida obtenida con la ayuda del tubo Pitot. $(h - h_c)$.
- 5.- Determinar la diferencia de velocidades entre los puntos 3 y 4 en el vertedero.
- 6.- Determinación del porcentaje de disipación.

e) Cuadros y Fórmulas

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

CARGA DE VELOCIDAD

$$h_c = 0.0002 \times \frac{\gamma}{d}$$

ALTURA POR CAPILARIDAD

LEY DE JURIN

CUADRO 1

Coeficiente de Tensión Superficial	
Temperatura °C	γ [N/m]x 10 ⁻³
0	75.64
10	74.22
20	72.75
30	71.18
40	69.56
50	67.91
60	66.20
100	58.90

6.2.3 Práctica #3 Cuenco Disipador Bureau of Reclamation II

a) Objetivo

Mediante la comparación de eficiencias entre disipadores de energía, disipador de esquí y USBR II se determinará el mejor cuenco disipador.

b) Introducción

El USBR fue desarrollado con el fin de utilizarlo para cuencos disipadores en vertederos de presas altas, presas de tierra y para estructuras de canales grandes. En la rápida del extremo aguas arriba el cuenco consta de bloques; y en las cercanías del extremo de aguas abajo contiene un umbral dentado, y puede llegar a ser efectivo hasta un número de Froude de 4.

c) Equipo

- Tubo Pitot
- Flexómetro
- Termómetro

d) Procedimiento

- 1.- Se realiza las instrucciones para la utilización del modelo.
- 2.- Se toma las medidas de carga de velocidad mediante la utilización del tubo Pitot en los puntos marcados en el vertedero.(pág.95)

3.- Determinación de la tensión superficial mediante el cuadro 1, y la utilización del termómetro para conocer la temperatura del agua.

4.- Mediante la formula de corrección por capilaridad de la Ley de Jurin, se realiza la corrección correspondiente a la medida obtenida con la ayuda del tubo Pitot. $(h - h_c)$.

5.- Determinar la diferencia de velocidades entre los puntos 3 y 4 en el vertedero.

6.- Determinación del porcentaje de disipación.

e) Cuadros y Fórmulas

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

$$h_c = 0.0002 \times \frac{\gamma}{d}$$

CARGA DE VELOCIDAD

ALTURA POR CAPILARIDAD

LEY DE JURIN

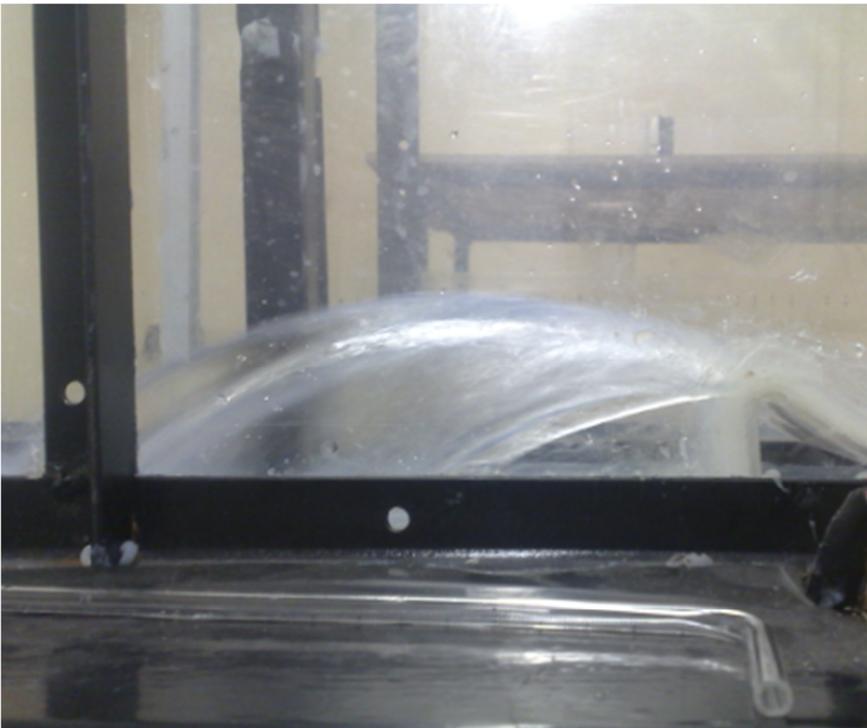
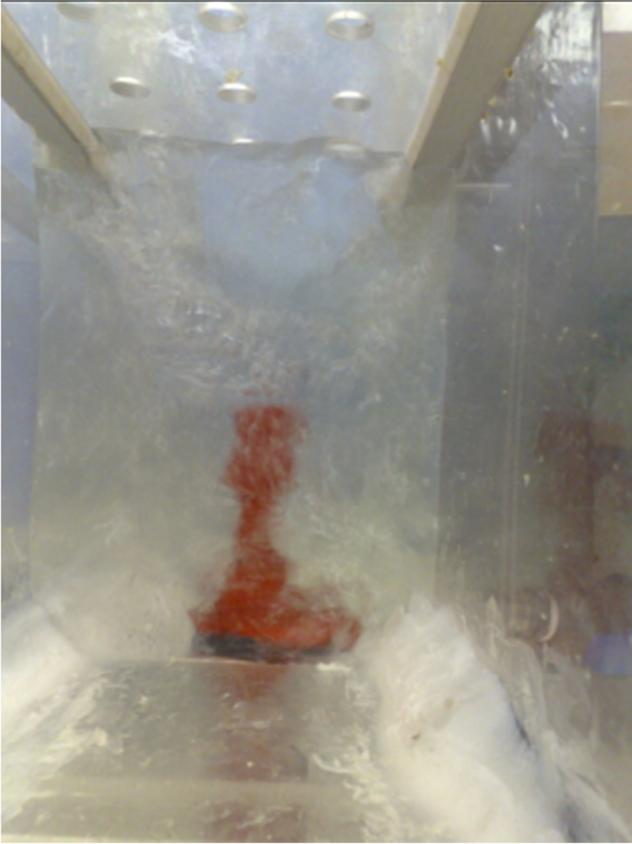
CUADRO 1

Coefficiente de Tensión Superficial	
Temperatura °C	γ [N/m]x 10 ⁻³
0	75.64
10	74.22
20	72.75
30	71.18
40	69.56
50	67.91
60	66.20
100	58.90

6.3 Ensayos realizados

6.3.1 Práctica #1

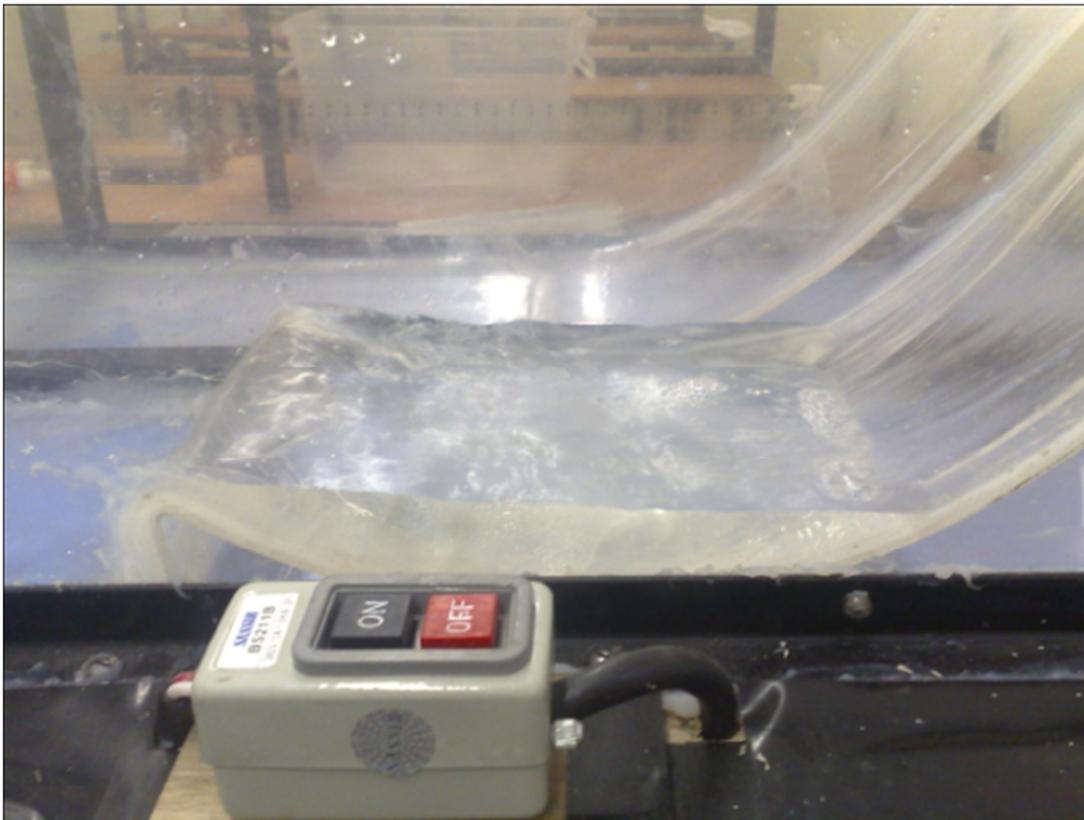
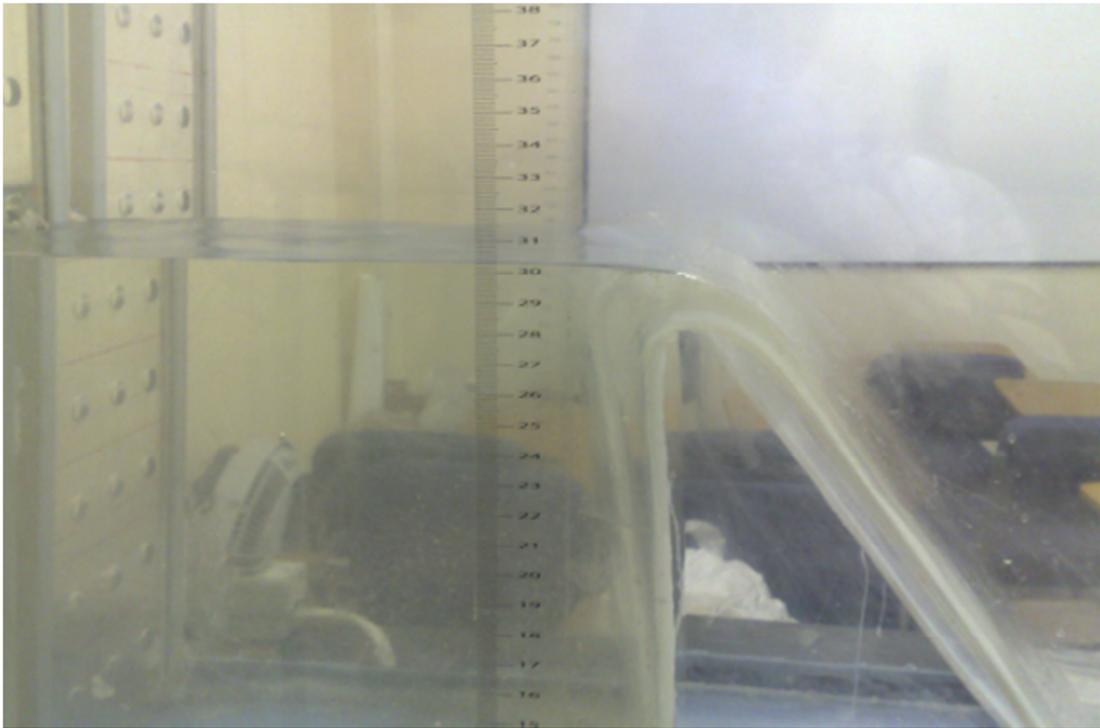
UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO				
Ensayo de Vertedero en Salto de Sky Simple				
INTEGRANTES:				GRUPOS:
TEMPERATURA °C:	<input style="width: 50px;" type="text"/>	Tension Superficial: [N/m]	<input style="width: 50px;" type="text"/>	
DIAMETRO PITOT (mm):	<input style="width: 50px;" type="text"/>			
CORRECCION hc [cm]:	<input style="width: 50px;" type="text"/>			
CARGA DE VELOCIDAD h [cm]	1	2	3	4
	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>
Media	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>
CARGA DE VELOCIDAD CORREGIDA [m]	1	2	3	4
	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>
VELOCIDAD [m/s]	1	2	3	4
	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>
PORCENTAJE DISIPADO Entre puntos (3) y (4)	<input style="width: 150px;" type="text"/>			%
Observaciones:	<hr/>			
	<hr/>			

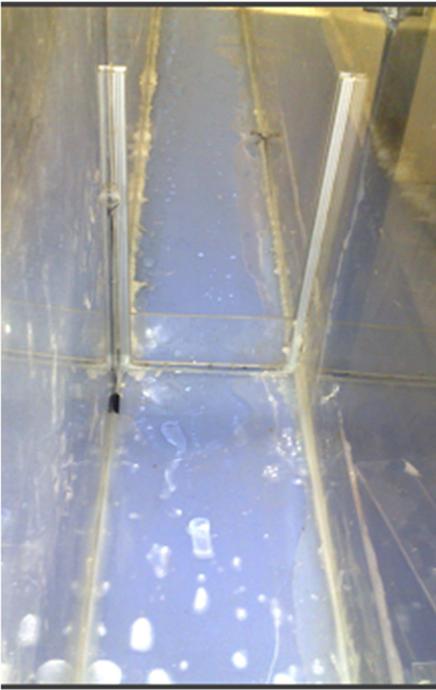
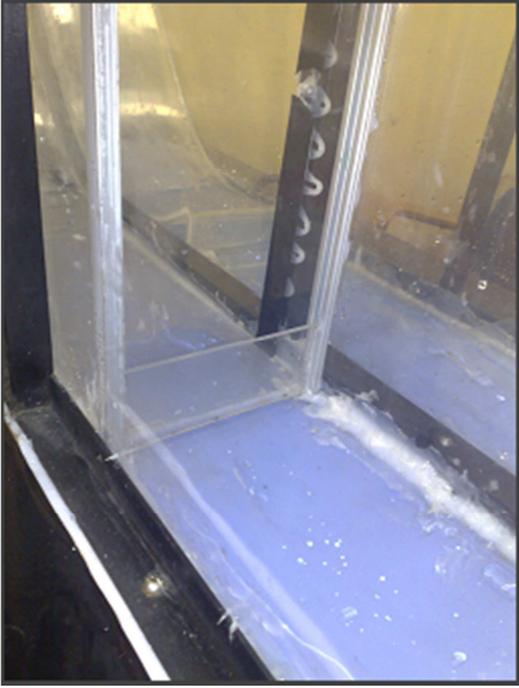


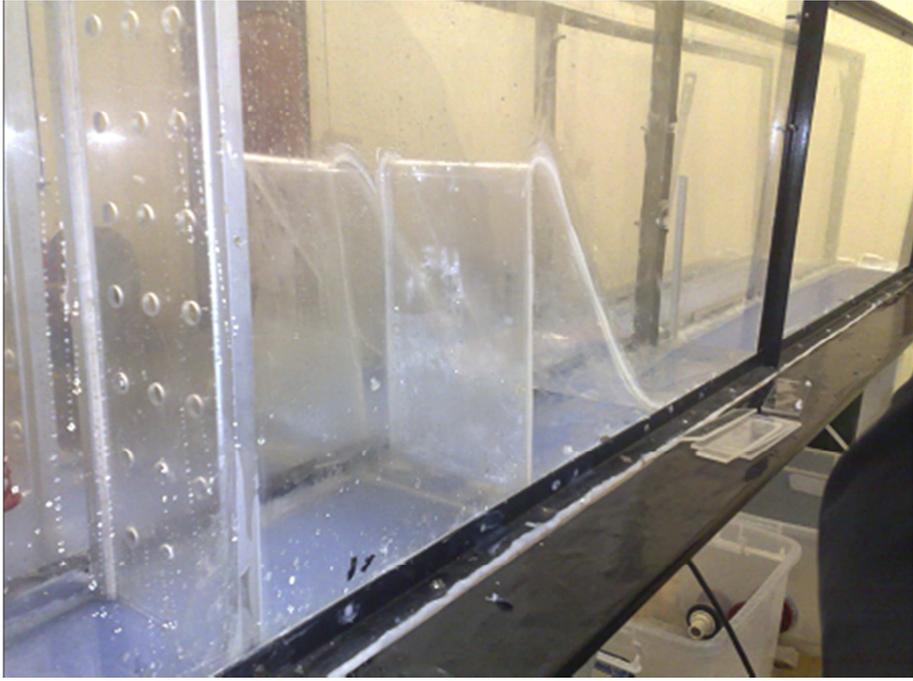


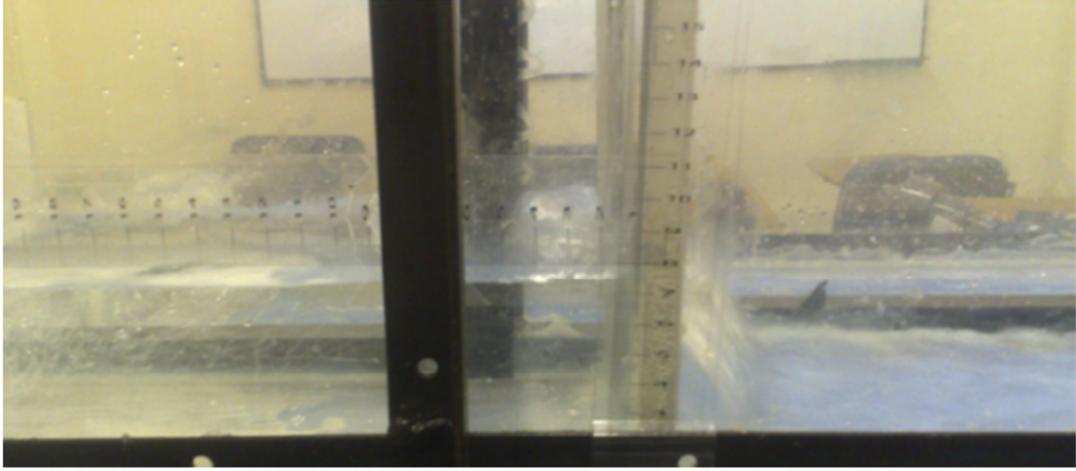
6.3.2 Práctica #2

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO		Ensayo	
de Vertedero en Salto de Sky Sumergido			
INTEGRANTES:			GRUPOS:
TEMPERATURA °C:	<input style="width: 80px;" type="text"/>	Tension Superficial: [N/m]	<input style="width: 80px;" type="text"/>
DIAMETRO PITOT (mm):	<input style="width: 80px;" type="text"/>		
CORRECCION hc [cm]:	<input style="width: 80px;" type="text"/>		
CARGA DE VELOCIDAD	1	2	3
h [cm]	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>
	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>
Media	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>
CARGA DE VELOCIDAD	1	2	3
CORREGIDA [m]	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>
	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>
VELOCIDAD	1	2	3
[m/s]	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>
	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>	<input style="width: 80px;" type="text"/>
PORCENTAGE DISIPADO	<input style="width: 150px; height: 30px;" type="text"/>		%
Entre puntos (3) y (4)			
Observaciones:	<input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>		
<input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>			
<input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>			
<input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>			









CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El modelo estará a disposición de futuras generaciones de estudiantes. El estudio combinado con dicho modelo y la presentación de teoría es vital para el aprendizaje y mejor comprensión de los fenómenos presentes en los modelos.
- Para llegar a conocer el fenómeno físico más fondo nos es necesario y de gran utilidad la modelación hidráulica. Muchos de los aspectos de los sistemas hidráulicos complejos no pueden ser modelados satisfactoriamente y es necesaria una mayor experiencia para su modelación y entendimiento. A pesar de esto, la implementación y uso de los modelamientos hidráulicos es aun una herramienta poderosa para obtener criterios de diseño hidráulicos valiosos.
- Nos es necesario tomar en cuenta el riesgo de realizar mediciones no buscadas.
- Las mediciones sofisticadas nos permiten obtener mejor información acerca de los efectos de escala, pero aun así no han logrado eliminar el criterio, buen juicio y experiencia del investigador para discernir ante diferentes resultados.

- Se pudo comprobar que las fórmulas y criterios usados fueron los correctos, al obtener los valores de altura por capilaridad para los tubos Pitot y compararlos con los resultados calculados con formulas.
- Dada la gama de materiales que se necesitan para la elaboración del modelo, así como los espesores de lámina de acrílico, no se nos hizo posible crear las dimensiones correctas, sino aproximadas, de bloques, rápidas y umbral dentado en el caso de vertedero USBR II, por lo que los resultados arrojados por el modelo no fueron los esperados pero aun así se nos hizo posible evidenciar disipación de energía.
- Al iniciar la construcción del modelo no se había considerado el hecho que se tendría que aumentar un perfil metálico extra, para darle mayor rigidez a las paredes de acrílico, por lo que posteriormente se tuvo que desarmar el modelo y colocar un nuevo perfil con las implicaciones de tiempo que esto conlleva.
- Cuando se inicio el modelo, no se tuvo en cuenta el efecto de velocidad generada por la bomba lo cual evidentemente concebía errores en los resultados de las mediciones ya que el flujo en la zona de aproximación se veía alterado por su elevada velocidad de aproximación.

- La solución desarrollada consistió en la elaboración de una placa de acrílico con orificios. Este tipo de placa nos ayudaría a que el flujo sea distribuido uniformemente. Otra posible solución podía haber sido ampliar el área de estanque, pero no nos fue posible ya que el acrílico ya fue colocado y pegado. Esta solución fue la mas optima que se pudo desarrollar y su acople al modelo fue perfecto.
- Se tuvo un problema adicional, que consistió en la pared de fondo del tanque, la misma que tuvo que ser reforzada para aguantar las presiones del agua y no se produzcan fugas de la misma. Se la reforzó con tres láminas de acrílico, las mismas que se las aseguro a los perfiles, cerciorándonos así de la no existencia de fugas y correcto funcionamiento del sistema.
- Las válvulas de control permiten un manejo adecuado del ingreso del agua a cada sistema, activando así cada uno de manera separada. El conjunto de válvulas y tuberías son los adecuados ya que los resultados obtenidos asi lo demuestran.
- Se pudo constatar una disminución de energía, que fue generada por los disipadores. El uso de cada disipador queda a disposición de diseñadores y constructores, ya que no siempre se tienen condiciones

ideales para la construcción del proyecto, es por esto que siempre es recomendable el hacer un estudio de factibilidad.

- Las tuberías, accesorios y mangueras utilizadas en el sistema hidráulico cumplen a cabalidad con su función de absorción del agua del tanque para ponerla en circulación en el modelo y sin la presencia de fugas.
- Es recomendable tomar la temperatura al inicio de cada ensayo ya que con el transcurso del tiempo el agua se puede ir calentando, esto debido a su paso por la bomba.
- La justificación para el uso de modelos a escala no se puede encontrar a base de ejercicios teóricos, y la única garantía de que el modelo hidráulico pueda tener éxito, es su implementación física ya que esto es propicio para el análisis del comportamiento de la estructura en su verdadera dimensión con sus respectivas mediciones.

