



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

“DISEÑO HIDRÁULICO DEL CANAL DE DISIPACIÓN QUE CONECTA UN CONDUCTO CON FLUJO SUPERCRÍTICO CON UN AFORADOR PARSHALL, EMPLEANDO UN MODELO A ESCALA”

Tesis para optar por el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

LUIS EDGARDO ABARCA HUAMÁN

Asesor: Dra. IRIS VIOLETA DOMINGUEZ TALAVERA

Lima, diciembre de 2013

RESUMEN

El presente trabajo brinda resultados de ensayos experimentales realizados para la determinación de la longitud, dimensiones de la sección transversal y la rugosidad absoluta que debe tener el canal de disipación aguas arriba un aforador Parshall, el cual se plantea como una propuesta de solución a un problema identificado en un proyecto real dentro de la actividad minera.

El estudio se aplica en una parte de la conducción del flujo de líquidos originados en el proceso de lixiviación de minerales, para lo cual básicamente se cuenta con una estructura conformada por un sistema de tuberías de colección de la solución lixiviada, la que luego se conecta una tubería denominada principal, la cual descarga a un canal de aproximación (disipador de energía) y a un aforador Parshall. Es en este canal de disipación en que el flujo impacta en la base del canal produciéndose un flujo turbulento en el aforador, lo cual origina gran imprecisión en la medición del caudal que atraviesa por este. Por lo tanto, se propone el dimensionamiento y las características de rugosidad para el canal de disipación, tal de obtener un flujo en régimen subcrítico, aguas abajo del flujo en régimen supercrítico. De esta manera se cumplirá con las condiciones que requiere el aforador Parshall para su correcto funcionamiento.

La solución al problema identificado, que se halló mediante el presente trabajo de tesis está basado en el desarrollo y la aplicación de un modelo físico del prototipo, construido a escala, cuyo diseño cumple la teoría de semejanza semejanza hidráulica. La fabricación del modelo, se realizó tomando en cuenta las condiciones y restricciones existentes del lugar donde fue instalado para fines de los ensayos a realizar, es decir, en el Laboratorio de Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

FACULTAD DE
 CIENCIAS E
 INGENIERÍA

 PONTIFICIA
 UNIVERSIDAD
 CATÓLICA
 DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Diseño hidráulico del canal de disipación que conecta un conducto con flujo supercrítico con un aforador Parshall, empleando un modelo a escala".
 Área : Recursos Hídricos -Investigación-
 Asesora : Dra. Iris V. Domínguez Talavera
 Alumno : LUIS EDGARDO ABARCA HUAMÁN
 Código : 2005.9311.2.412
 Tema N° : 54
 Fecha : Lima, 19 de diciembre de 2012



ANTECEDENTE

En hidráulica empleamos modelos físicos o experimentales, así como modelos numéricos, conocidos también como matemáticos o analíticos. Generalmente construimos modelos físicos a escala reducida de la estructura o sistema – llamada "prototipo" –, cuyas características y condiciones de servicio queremos reproducir, sea para fines de diseño o de simulación de estructuras o sistemas existentes. En situaciones difíciles de "reproducir" matemáticamente, es decir, de modelar mediante fórmulas matemáticas, como son los casos, por ejemplo, del flujo rápidamente variado, flujo de dos fases donde se observa vórtices y cavidades etc., los modelos experimentales son de particular utilidad, como en el presente caso.

JUSTIFICACIÓN

En el Perú, el crecimiento de la economía ha traído consigo numerosos proyectos de ingeniería que demandan soluciones creativas con sólida base científico-técnica. En proyectos de minería que se desarrolla en diferentes lugares del país, se requiere estructuras hidráulicas para la recolección de escumamientos, conducción y medición de los flujos, lo cual presenta singularidades según condiciones y restricciones locales, por ejemplo, la topografía de pronunciadas pendientes en la sierra determina el régimen del flujo. El propósito del presente tema de tesis es resolver una situación real. En campo se ha observado que la estructura de medición de tipo Parshall recibe flujo supercrítico de un conducto que trabaja a sección parcialmente llena.

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo de tesis consiste en el diseño hidráulico del canal de disipación que conecta un conducto de sección circular que trabaja a sección parcialmente llena en régimen supercrítico, con un flume Parshall que recibirá el flujo en régimen subcrítico para fines de medición del caudal. El tesista llevará a cabo el diseño del canal de disipación empleando un modelo a escala reducida que él mismo dimensionará y definirá en detalle.

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍAPONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

METODOLOGÍA

Para desarrollar el tema propuesto, el tesista considerará las siguientes fases:

1. Revisión de bibliografía, y presentación de un marco teórico y conceptual sobre el tema a desarrollar
2. Presentación del concepto del modelo a escala reducida con el que realizará los ensayos para fines del diseño del canal de disipación
3. Dimensionamiento, definición en detalle y construcción del modelo a escala reducida, considerando las condiciones locales, de equipos e instalaciones, del Laboratorio de Hidráulica de PUCP, donde se trabajará con el modelo a escala
4. Realización de los ensayos en el laboratorio, y registro de observaciones, datos e información que se obtenga durante los ensayos
5. Procesamiento y análisis del registro de los ensayos realizados
6. Diseño hidráulico del canal de disipación que conecta el conducto y el aforador Parshall, en base de los ensayos realizados
7. Elaboración del documento sobre el tema de tesis, incluido recomendaciones y conclusiones.

PLAN DE TRABAJO

Para las revisiones, se presentará el siguiente avance:

<u>Primera revisión:</u>	Puntos 1 y 2.
<u>Segunda revisión:</u>	Punto 3.
<u>Tercera revisión:</u>	Punto 4, 5 y 6.
<u>Cuarta revisión:</u>	Punto 7.



NOTA

Extensión máxima: 100 página.





A Dios, por ser el soporte espiritual para lograr cada una de mis metas.

A mis padres Edgardo Y Vilma, por la motivación, comprensión, amor y apoyo constante en cada meta que me propongo.

A mi hermana Paola, por su solidaridad, apoyo incondicional y tolerancia.

A mis tíos Helena y Percy, por su apoyo y generosidad.

Luis Edgardo Abarca Huamán

AGRADECIMIENTOS

Expreso un profundo agradecimiento y reconocimiento a mis padres por su constante apoyo, el cual hizo posible la culminación de este documento.

También, un especial agradecimiento a mi asesora Dra. Iris Violeta Dominguez, por su interés y tiempo brindado durante el desarrollo de esta tesis. Sus consejos y conocimientos han sido un aporte importante para culminar con éxito este trabajo.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

GENERALIDADES.....1

1.1. Descripción del problema.....1

1.2. Objetivos1

1.3. Plan de trabajo2

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.....3

2.1. Revisión de estudios anteriores3

2.1.1. Transición abrupta de canal circular a canal rectangular.....3

2.1.2. Flujo de aire en una caída abrupta5

2.2. Aforador Parshall7

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL MODELO FÍSICO.....9

CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN E INSTALACIÓN DE MODELO EN LABORATORIO 23

CAPÍTULO V

DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS 25

5.1. Nivel de agua a la entrada del tubo de descarga 25

5.2. Flujo en canal con base de rugosidad baja 26

5.3. Flujo en canal de disipación con base de rugosidad media 27

5.4. Flujo en canal de disipación con base de rugosidad alta..... 29

5.5. Barrera simple en el canal de disipación con base de rugosidad media..... 30

5.6. Barrera simple en el canal de disipación con base de rugosidad alta 31

5.7. Barrera dentada en el canal de disipación con base rugosidad alta..... 32

5.8. Barrera empedrada en el canal de disipación con base de rugosidad alta 33

5.9. Flujo en canal de disipación con base empedrada 35

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y PRESENTACION DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MODELO 36

6.1. Cálculo del nivel de agua a la entrada del tubo de descarga y comparación con los resultados experimentales 36

6.2.	Cálculo del tirante en el tubo de descarga y comparación con los resultados obtenidos experimentalmente	39
6.3.	Cálculo de longitud de caída del chorro de agua	41
6.4.	Ensayos realizados con variación de rugosidad en el canal de disipación.....	43
6.4.1.	Flujo en canal con base de rugosidad baja.....	43
6.4.2.	Flujo en canal con base de rugosidad media.....	45
6.4.3.	Flujo en canal con base de rugosidad alta	46
6.5.	Ensayos realizados haciendo uso de barreras como disipadores de energía	47
6.5.1.	Barrera simple en canal de disipación con base de rugosidad media.....	48
6.5.2.	Barrera simple en canal de disipación con base de rugosidad alta	55
6.5.3.	Barrera dentada en el canal de disipación con base de rugosidad alta	61
6.5.4.	Barrera empedrada en el canal de Disipación con base de rugosidad alta.....	66
6.6.	Ensayo realizado en canal de disipación con base empedrada	72
6.6.1.	Análisis del resalto hidráulico	73
CAPÍTULO VII		
DIMENSIONAMIENTO A ESCALA REAL (PROTOTIPO).....		
7.1.	Cálculo de la rugosidad del modelo	77
7.1.1.	Estimación de la rugosidad absoluta “K”	79
7.1.2.	Cálculo del coeficiente “C” de Chezy	86
7.1.3.	Cálculo del coeficiente de fricción de Manning “ n_p ” del prototipo	87
7.2.	Dimensiones del prototipo.....	88
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
CONCLUSIONES.....		
		91
RECOMENDACIONES.....		
		95
BIBLIOGRAFÍA		

ÍNDICE DE TABLAS

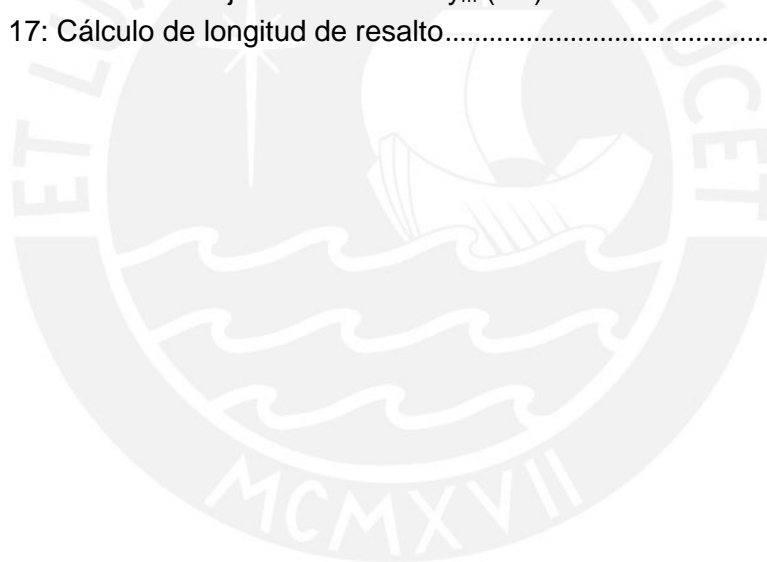
TABLA N° 1: Dimensiones de prototipo y modelo	11
TABLA N° 2: Carga de agua sobre el tubo de descarga	36
TABLA N° 3: Comparación entre resultados experimentales y matemáticos.....	38
TABLA N° 4: Condiciones iniciales para el tubo de descarga	39
TABLA N° 5: Tirante y velocidad en el tubo de descarga.....	41
TABLA N° 6: Comparación de los resultados experimentales con los calculados	41
TABLA N° 7: Mediciones experimentales de longitud de caída de chorro.....	42
TABLA N° 8: Mediciones experimentales de tirantes en el canal de rugosidad baja.....	43
TABLA N° 9: Mediciones experimentales de tirantes en el canal de rugosidad media	45
TABLA N° 10: Mediciones experimentales de tirantes en el canal de rugosidad alta.....	46
TABLA N° 11: Longitudes de caída libre “ L_1 ”medidos experimentalmente.....	49
TABLA N° 12: Alturas de flujo sobre la barrera medidos experimentalmente	50
TABLA N° 13: Longitud de turbulencia medida experimentalmente	51
TABLA N° 14: Tirantes “ y_m ” medidos experimentalmente usando la barrera simple sobre el canal con base de rugosidad media.....	53
TABLA N° 15: Longitudes de caída libre “ L_1 ”medidos experimentalmente.....	55
TABLA N° 16: Alturas de flujo sobre la barrera medidos experimentalmente	56
TABLA N° 17: Longitud de turbulencia medida experimentalmente	57
TABLA N° 18: Tirantes “ y_m ” medidos experimentalmente usando la barrera simple sobre el canal con base de rugosidad alta	59
TABLA N° 19: Longitudes de caída libre “ L_1 ”medidos experimentalmente.....	61
TABLA N° 20: Alturas de flujo sobre la barrera medidos experimentalmente	62
TABLA N° 21: Longitud de turbulencia medida experimentalmente	63
TABLA N° 22: Tirantes “ y_m ” medidos experimentalmente usando la barrera dentada sobre el canal con base de rugosidad alta	64
TABLA N° 23: Longitudes de caída libre “ L_1 ”medidos experimentalmente.....	67
TABLA N° 24: Alturas de flujo sobre la barrera medidos experimentalmente	68
TABLA N° 25: Longitud de turbulencia medida experimentalmente	69
TABLA N° 26: Tirantes “ y_m ” medidos experimentalmente usando la barrera empedrada sobre el canal con base de rugosidad alta	70
TABLA N° 27: Tirantes medidos experimentalmente	72
Tabla N° 28: Tirantes conjugados medidos experimentalmente	73
Tabla N° 29: Medición experimental de altura de piedras de “altura menor”	80
Tabla N° 30: Medición experimental de altura de piedras de “altura media”	81
TABLA N° 31: Medición experimental de altura de piedras de “altura mayor”	84
TABLA N° 32: Variables estadísticas.....	85
TABLA N° 33: Resumen de medición experimental de altura de piedras.....	85
TABLA N° 34: Estimación experimental de la rugosidad absoluta en el modelo	86
TABLA N° 35: Dimensiones del canal de disipación	90
TABLA N° 36: Comparación de números de Froude calculados en el modelo.....	92
TABLA N° 37: Comparación de resultados obtenidos en ensayos realizados con uso de barreras.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 1: Aparato de ensayo de transición abrupta de canal circular a canal rectangular	4
FIGURA N° 2: Flujo supercrítico en una caída abrupta	6
FIGURA N° 3: Dimensiones del canal del Laboratorio de Hidráulica de la PUCP	15
FIGURA N° 4: Estimación de longitud de resalto hidráulico.....	16
FIGURA N° 5: Plano para construcción de modelo físico.....	22
FIGURA N° 6: Modelo físico para ensayos	23
FIGURA N° 7: Perfil de carga hidráulica sobre el tubo de descarga	25
FIGURA N° 8: Vista de ingreso de flujo a través del tubo de descarga	26
FIGURA N° 9: Perfil del flujo de descarga a través del tubo de descarga	26
FIGURA N° 10: Canal con base de rugosidad baja.....	27
FIGURA N° 11: Vista general de canal con base de rugosidad media	28
FIGURA N° 12: Canal con base de rugosidad alta.....	29
FIGURA N° 13: Vista general de flujo utilizando barrera simple sobre canal de rugosidad media.....	30
FIGURA N° 14: Vista de planta de barrera simple sobre canal de rugosidad alta	31
FIGURA N° 15: Barrera dentada sobre canal de rugosidad alta	32
FIGURA N° 16: Barrera empedrada.....	34
FIGURA N° 17: Canal de con base empedrada.....	35
FIGURA N° 18: Tirante de flujo a la salida del tubo de descarga.....	39
FIGURA N° 19: Cálculo del tirante en un canal circular.....	40
FIGURA N° 20: Perfil de longitud de caída de chorro	42
FIGURA N° 21: Perfil generado por impacto de flujo en la barrera.....	48
FIGURA N° 22: Perfil de flujo con barrera simple a 14 cm del punto de descarga	49

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO N° 1: Longitud de caída de caída libre – L_1 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm) ..	50
GRÁFICO N° 2: Altura de flujo sobre la barrera – h (cm) vs. Ubicación de barrera (cm).....	51
GRÁFICO N° 3: Longitud de turbulencia – L_2 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)	52
GRÁFICO N° 4: Tirante en flujo desarrollado - y_m (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)	53
GRÁFICO N° 5: Longitud de caída de caída libre – L_1 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm) ..	56
GRÁFICO N° 6: Altura de flujo sobre la barrera – h (cm) vs. Ubicación de barrera (cm).....	57
GRÁFICO N° 7: Longitud de turbulencia – L_2 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)	58
GRÁFICO N° 8: Tirante en flujo desarrollado - y_m (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)	59
GRÁFICO N° 9: Longitud de caída de caída libre – L_1 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm) ..	62
GRÁFICO N° 10: Altura de flujo sobre la barrera – h (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)	63
GRÁFICO N° 11: Longitud de turbulencia – L_2 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)	64
GRÁFICO N° 12: Tirante en flujo desarrollado - y_m (cm) vs. Ubicación de barrera (cm).....	65
GRÁFICO N° 13: Longitud de caída libre – L_1 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)	67
GRÁFICO N° 14: Altura de flujo sobre la barrera – h (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)	68
GRÁFICO N° 15: Longitud de turbulencia – L_2 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)	69
GRÁFICO N° 16: Tirante en flujo desarrollado - y_m (cm) vs. Ubicación de barrera (cm).....	70
GRÁFICO N° 17: Cálculo de longitud de resalto.....	75



INTRODUCCIÓN

Dentro de los diferentes procesos de esta actividad se encuentra involucrada el agua tanto para la extracción y recuperación de minerales como el oro, plata, cobre, entre otros, lo cual ha generado la necesidad de utilizar estructuras articuladas como tuberías, canales, aforadores de caudal, entre otros. Específicamente hablando de la extracción de oro, uno de los métodos más utilizados para la obtención del mismo, es el proceso de lixiviación. Dicho proceso consiste en el apilamiento de mineral en un área especialmente acondicionada para su acumulación, llamada “Plataforma de Lixiviación”.

El mineral en mención es colocado en forma de banquetas, las cuales, de acuerdo a un plan de carguío programado, son regadas con una solución cianurada, que por infiltración llega hasta la base de la plataforma disolviendo el mineral que encuentra en su camino mediante el proceso químico de lixiviación. Es importante mencionar que dicha plataforma se encuentra debidamente impermeabilizada.

Cuando la solución con mineral llega a la base de la plataforma, es colectada mediante un sistema de tuberías perforadas (sistema de colección de solución), las cuales se conectan a su vez con tuberías principales. Dichas tuberías descargan, por gravedad, en tramos relativamente cortos de canales abiertos aguas abajo de los cuales se encuentran instalados aforadores del tipo Parshall.

Finalmente, una vez que el flujo pasa por este sistema de control (aforadores Parshall), es descargado en pozas especialmente acondicionadas para su almacenamiento, para luego proceder con su procesamiento.

Cabe mencionar que a través de los aforadores Parshall se mide el caudal del flujo que se descarga al canal de disipación, el mismo que permite estimar la recuperación de mineral. Además, el correcto funcionamiento de estas estructuras depende del flujo de llegada a las mismas, el cual debe ser tranquilo y no turbulento, en régimen subcrítico.

Sin embargo, en contraste con lo antes mencionado, de acuerdo a las observaciones realizadas en campo, el flujo que pasa a través del aforador Parshall es turbulento, haciendo imprecisas las mediciones realizadas en este.

En consecuencia, para saber cómo se puede llegar a obtener un flujo subcrítico, se optó por realizar ensayos en un modelo físico a escala, simulando el sistema que se encontró en campo aguas arriba del aforador (tubo de descarga - canal de disipación), cuyas características se presentan a continuación.

Características de tubo de descarga	
Diámetro de tubo	0.6 m
Pendiente de tubo	2%
Caudal	0.6 m ³ /s

Características canal de dissipación	
Base	1.3 m
Altura	0.9 m

En base al contexto mencionado, con el objetivo de lograr un flujo subcrítico, se ensayó en el Laboratorio de Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) diferentes alternativas a poder implementarse en campo, como son la variación de rugosidad del fondo del canal y uso barreras transversales como dissipadores, cuyos resultados se presentan en este documento. Estas alternativas fueron planteadas considerando la forma usual de instalación del sistema y las restricciones locales que se presentan en campo para la descarga de la tubería principal del sistema de colección de solución hacia el lugar de almacenamiento de la solución (Poza de operaciones).

Durante los ensayos realizados se utilizó el siguiente equipo de medición:

Limnómetro: Instrumento que nos permite medir la altura a la cual llega el tirante de agua sobre el fondo del canal.

Caudalímetro: Instrumento utilizado para la medición de caudal.

Regla graduada: Instrumento dividido en unidades de longitud. Se utilizó una regla dividida en centímetros.

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1. Descripción del problema

En base al contexto descrito en la introducción, el presente trabajo está enfocado en analizar el sistema “tubo de descarga – canal de disipación”. En el cual, de acuerdo a la situación real que se pudo observar en campo, el flujo que pasa a través del tubo principal de descarga impacta en la base del canal de disipación, aguas arriba del aforador Parshall, generándose una turbulencia a lo largo del canal en mención hasta llegar al aforador. Dicha condición no favorece al correcto funcionamiento de un aforador, ya que este requiere que el flujo se encuentre en régimen subcrítico.

Por tal motivo, se decidió realizar la modelación física de este sistema para ensayar y evaluar en él diferentes alternativas con las cuales se pueda llegar a obtener un flujo en régimen subcrítico.

1.2. Objetivos

El trabajo de tesis tiene por objetivo general, estimar la longitud necesaria que debe tener el canal de disipación y la rugosidad del fondo del canal para obtener un flujo en régimen subcrítico. Con lo cual se busca garantizar el correcto funcionamiento del aforador Parshall que se encuentra aguas abajo de este sistema.

Por otro lado, debido al vínculo de la solución planteada con la actividad minera, el logro de este objetivo beneficiará a la misma en los siguientes puntos:

- Cuantificar el volumen de solución cianurada, que pasa por el canal de disipación y aforador Parshall, para estimar de forma más exacta la cantidad de mineral obtenido del proceso de lixiviación.
- La precisión en la medición del flujo a través de los aforadores ayudará en la toma de decisiones con respecto al proceso de lixiviación, debido a que la cantidad de mineral obtenido está relacionado a la tasa de riego estimada en un área de mineral apilado.
- Tener un mejor conocimiento de la cantidad exacta del caudal que pasa a través de los aforadores para gestionar el almacenamiento en la infraestructura correspondiente.
- Instituir convenientes y precisos métodos de medición del caudal, de tal manera que ayude a mejorar la evaluación de filtraciones o demás problemas que pueden causar pérdidas de flujo debido a la poca eficiencia del revestimiento de

la plataforma de lixiviación o del sistema colector, permitiendo verificar la viabilidad de las propuestas de beneficios en costos para mejorar los sistemas mencionados.

1.3. Plan de trabajo

El trabajo se realizará de la siguiente manera:

- Se comenzará revisando documentos de ensayos experimentales realizados anteriormente.
- Lugo se definirá las condiciones que se deberán simular en el modelo físico.
- Para estimar las dimensiones y el flujo que deberá circular a través del modelo físico, se revisará bibliografía relacionada a cálculos de semejanza hidráulica.
- Con los valores obtenidos de la semejanza hidráulica se construirá el modelo físico con ayuda de un técnico especialista.
- Una vez que se tenga el modelo físico construido, se procederá con su instalación en el Laboratorio de Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Con el modelo físico instalado se procederá con los ensayos programados y toma de datos.
- Finalmente se procesará la información obtenida de los ensayos experimentales realizados para estimar la rugosidad y longitud del canal de disipación necesaria para lograr un flujo de régimen subcrítico.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Dentro de la hidráulica, se presentan situaciones que resultan difíciles de modelar mediante fórmulas matemáticas; como ejemplo de ello se tiene el flujo rápidamente variado, fenómeno que se pudo observar en campo y se quiere reproducir en la presente Tesis. Por tal motivo y como solución a la problemática planteada en el capítulo anterior, se ha optado por la construcción de un modelo físico a escala reducida denominado “modelo” del sistema “tubo de descarga - canal de disipación”. Dicho modelo fue construido a partir de condiciones y características similares al mismo sistema en escala real, el cual es denominado “prototipo”.

Con esta finalidad, como parte del proceso de investigación, se ha buscado y revisado estudios realizados anteriormente similares al planteado, los cuales son descritos brevemente a continuación; además, para conocer las condiciones de funcionamiento de un aforador Parshall se describirán las mismas.

2.1. Revisión de estudios anteriores

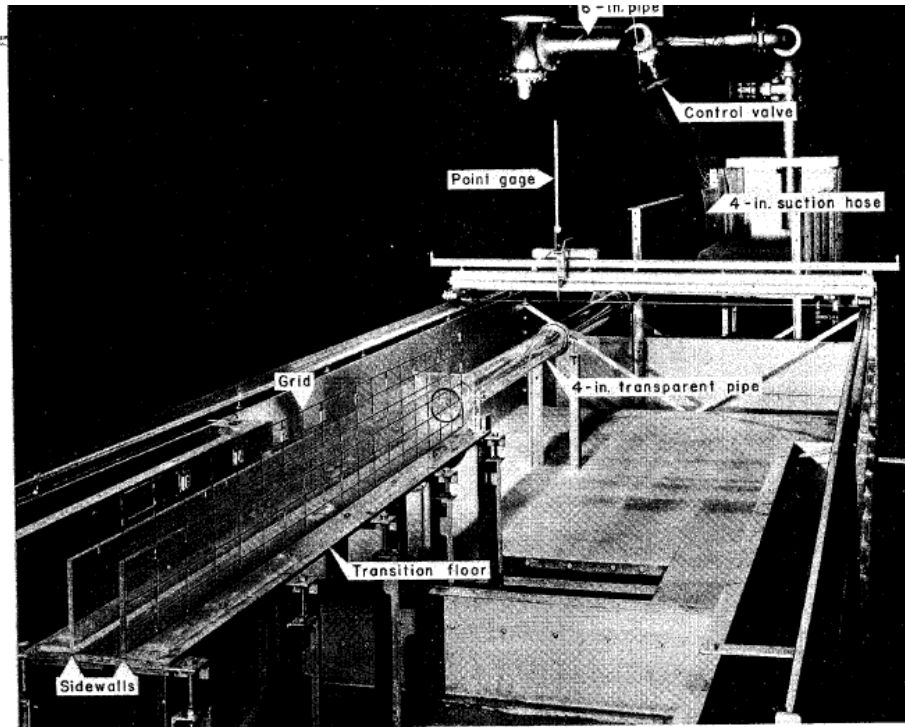
Para plantear una solución al problema identificado, se ha buscado y estudiado documentos referidos a ensayos anteriores que han sido realizados en condiciones similares a las encontradas en campo, con la finalidad de conocer los procedimientos de ensayo y otros aspectos que puedan ayudar al propósito de este documento. En los siguientes párrafos se procederá a realizar una breve descripción de los siguientes artículos, los cuales están anexados en este documento.

- Abrupt Transition from a Circular Pipe to a Rectangular Open Channel (Blaisdell, Donnely y Yalamanchili 1969).
- Air-water flow structures at an abrupt drop with supercritical flow (Chanson y Toombes 2012).

2.1.1. Transición abrupta de canal circular a canal rectangular

El ensayo realizado por la Universidad de Minnesota, considera una transición abrupta de canal circular a uno rectangular abierto; dicha condición se asemeja al modelo físico propuesto en el presente documento. El ensayo referido se describirá de manera general a continuación.

FIGURA N° 1: Aparato de ensayo de transición abrupta de canal circular a canal rectangular



Fuente: BLAISDELL, Fred W., Charles A. DONNELLY y Kesavarao YALAMANCHILI. *Abrupt Transition from a Circular Pipe to a Rectangular Open Channel*. Minnesota, pag 4

a) Características del modelo ensayado de Blasidell, Donnelly y Yalamanchili

Dentro de las características del modelo ensayado en el documento referido, podemos encontrar las siguientes similitudes con el modelo físico que se construyó para esta tesis:

- La transición entre canal circular y canal rectangular es abrupta.
- El ancho del canal rectangular no es menor al diámetro del tubo.
- La base del canal se encuentra bajo el nivel del tubo de descarga.

Adicionalmente, este modelo presenta las siguientes características particulares:

- El tubo de descarga se encuentra en posición horizontal, a diferencia del que se utilizó en el ensayo realizado, el cual se encuentra inclinado.

b) Descripción del programa de ensayo de Blasidell, Donnelly y Yalamanchili

Durante la ejecución del ensayo referido, se consideraron variables independientes para determinar el comportamiento de la transición y desarrollar un criterio de diseño.

- Ancho del canal de transición con respecto al diámetro del tubo.
- Elevación de la base del canal de transición con respecto a la parte inferior del tubo de descarga.

Cabe mencionar que en esta tesis se consideró valores fijos para los parámetros listados.

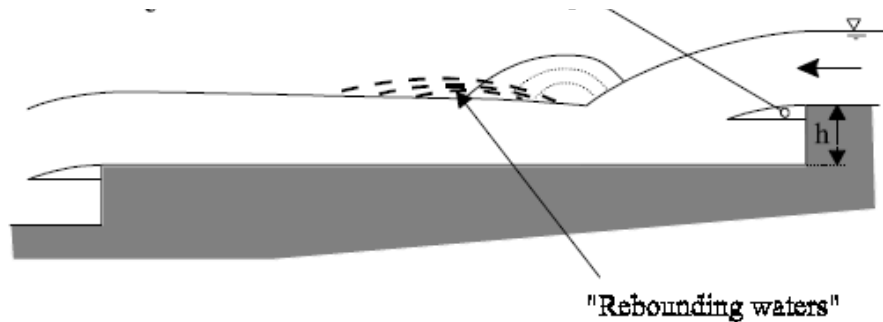
A su vez, en el ensayo referido se consideró dos variables dependientes las cuales se nombra a continuación:

- La altura del canal de transición para contener el flujo de agua.
- La longitud del canal de transición para asegurar satisfactoriamente las condiciones de flujo.

Para mayor información acerca del ensayo referido, se sugiere revisar el Anexo A1.

2.1.2. Flujo de aire en una caída abrupta

Otro de los estudios al cual se hace referencia, es el realizado por la Universidad de Queensland, en el que se muestra la influencia del aire involucrado en la caída de chorro que pasa a través de un canal rectangular. Dicha información fue considerada como una referencia para los ensayos realizados para esta tesis. A continuación se procederá a detallar algunos puntos importantes del documento referido.

FIGURA N° 2: Flujo supercrítico en una caída abrupta


Fuente: CHANSON H. y TOOMBES "Air-water flow structures at an abrupt drop with supercritical flow" (en línea).
 Consulta: 24 de Julio del 2012
 (<http://staff.civil.uq.edu.au/h.chanson/reprints/icmf2.pdf>)

a) Características del modelo ensayado de Chanson y Toombes

Dentro de las características del modelo ensayado, podemos encontrar las siguientes similitudes con el modelo realizado en la presente tesis:

- El régimen del flujo de descarga es supercrítico.
- La descarga de flujo se realiza hacia un canal de base rectangular.
- Caída abrupta del canal de descarga.

Una característica particular de este ensayo, es que durante su ejecución se tomaron medidas de concentración de aire, en varias partes del flujo descargado.

b) Resultados experimentales del modelo ensayado de Chason y Toombes

Dentro de los resultados obtenidos en este ensayo, mencionaremos aquellos que fueron tomados en cuenta durante el ensayo realizado para la presente tesis. Si se desea revisar de manera completa el artículo del ensayo referido, este se encuentra en el Anexo 2.

- En una caída abrupta, la aireación de la superficie libre toma lugar a lo largo de las interfaces del chorro.
- El principal aire contenido es máximo aguas abajo del punto de impacto, en la zona de "spray", y mínimo cerca del final de la grada.
- La caída abrupta es altamente aireada, y la aireación del flujo afecta las características de las ondas de choque.

- Se observa un flujo tridimensional, como son las ondas de choque y las ondas estacionarias en las paredes del canal. Las características de las ondas de choque y las ondas estacionarias están relacionadas al número de Froude aguas abajo.

2.2. Aforador Parshall

Desarrollado en 1922, después de haber realizado varias modificaciones al aforador Venturi, cambios que permitieron que este soporte mayores grados de sumergencia sin que afecte al caudal que pasa a través de él. Este nuevo vertedero incluía una caída del fondo del aforador, con lo cual se incitaba a un flujo supercrítico a través de la garganta de este.

a) Principios de Operación

El aforador Parshall está constituido de dos partes:

1. El aforador (Tramo convergente, garganta y tramo divergente)
2. Un dispositivo de medición.

Un aforador Parshall es una estructura de canal abierto con cambios de forma en toda su longitud, los cuales consisten en la convergencia de las paredes a la entrada de este, la elevación de la base a la entrada hacia la garganta del aforador, lo cual incrementa la velocidad del flujo, y una sección de divergencia a la salida del mismo.

El flujo a través del aforador Parshall puede ser determinado mediante la medición del tirante en un punto definido a cierta distancia de la entrada. La relación entre el caudal que pasa a través de él y el tirante medido, se puede obtener a través de ecuaciones matemáticas o curvas de calibración, las cuales no serán tratadas en este documento.

Cabe mencionar que para aforadores de garganta corta, como el aforador Parshall, se debe especificar donde se encuentra la sección en la que se está realizando la medición, especialmente si estos son calibrados empíricamente.

b) Condiciones de Llegada al Aforador Parshall

Dentro de las condiciones necesarias para un correcto funcionamiento, se considera que los aforadores no deben ser instalados cerca del flujo de aguas turbulentas ni en zonas donde la velocidad no sea uniforme, ya que estas condiciones pueden causar grandes errores en la medición del caudal, por lo que se recomienda que el flujo de llegada sea

tranquilo, lo cual es definido como aquel flujo que se desarrolla a través de los canales con una pendiente media, sin turbulencia, sin ondas y libre de curvas.

De acuerdo al artículo Hydraulic Design of Flow Measuring Structures (Replogle, Clemmens y Pugh 2004), se sugiere algunas condiciones del canal de llegada para el tirante de flujo, nivel de medición y ancho del canal.

c) Condiciones de instalación del aforador Parshall

Las condiciones de instalación de este tipo de aforador son:

- El flujo aguas arriba debe ser tranquilo, con una velocidad uniforme.
- El fondo del aforador debe ser nivelado tanto longitudinalmente como transversalmente.
- Se debe tomar en consideración la posible sumergencia que ocurra aguas abajo, a la salida del aforador, el cual puede ser causado por el incremento del flujo a través de este.
- Cabe mencionar que de acuerdo al tipo de flujo que pasará a través del aforador se podrá elegir el dispositivo para medir el tirante.

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL MODELO FÍSICO

Para estimar la longitud necesaria de canal de disipación en el cual se pueda alcanzar un flujo subcrítico, se optó por elaborar un modelo físico experimental con el cual se espera reproducir el comportamiento de flujo observado en campo y realizar los ensayos necesarios para lograr nuestro objetivo.

Este modelo replica la descarga del flujo a través de un tubo con una pendiente supercrítica a un canal rectangular con pendiente suave, en el cual podremos estimar la longitud necesaria para estabilizar el flujo turbulento.

El diseño del modelo parte de las condiciones del sistema “Tubo de descarga – Canal de disipación” encontradas en campo, las cuales se presentan a continuación:

- Características del tubo de descarga:
 - Diámetro: 24”.
 - Material: HDEP (High Density Polietileno)
 - Rugosidad del material: $n=0.009$
 - Pendiente de fondo del tubo: $s= 0.02\text{m/m}$
 - Caudal: $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$. a tubo parcialmente lleno, por lo que este será tratado como un canal.

- Características de canal:
 - Rugosidad de material de recubrimiento (fibra de vidrio) $n = 0.009$
 - Pendiente del fondo del canal $s = 0.0001\text{m/m}$
 - Altura de pared de canal $h = 0.9\text{m}$

Por otro lado, las características del canal del laboratorio de hidráulica de la Pontificia Universidad Católica del Perú son:

- Mínima escala del caudalímetro instalado = 5 litros por segundo.
- Ancho del canal disponible = 0.4 m.
- Altura de canal = 0.53 m.
- Longitud de canal = 9.0 m.

A continuación se describen los pasos seguidos para el diseño del modelo:

1. El diseño del modelo parte de la elección de la escala utilizar, la cual se determinó de acuerdo al valor mínimo de lectura que se podía realizar en el caudalímetro (5 lts/s). El cálculo de esta se muestra a continuación, haciendo uso de la semejanza hidráulica:

- a. Partiendo de la expresión de caudal.

$$Q = V \times A$$

Dónde:

Q : Caudal

V : Velocidad

A : Área

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{L^2}$$

- b. Se asume el mismo número de Froude en el modelo y el prototipo, como se muestra a continuación.

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

- c. Considerando que la gravedad es la misma tanto en el modelo como en el prototipo, se simplifica esta y se reemplaza la velocidad obtenida de la expresión de caudal en la relación de Froude, se tiene:

$$\frac{\frac{Q_p}{L_p^2}}{L_p^{1/2}} = \frac{\frac{Q_m}{L_m^2}}{L_m^{1/2}}$$

$$\frac{Q_p}{L_p^{5/2}} = \frac{Q_m}{L_m^{5/2}}$$

$$Q_m = Q_p \times \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{5/2}$$

- d. Finalmente, se reemplaza en la expresión hallada los valores definidos del caudal del prototipo y del modelo, se determina el la escala utilizar:

$$0.005 \frac{m^3}{s} = 0.6m^3/s \times \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{5/2}$$

$$\frac{L_p}{L_m} = 6.8$$

2. Haciendo uso de la escala hallada, las dimensiones del diámetro, altura de caída y base de canal se muestran en la Tabla 1.

TABLA N° 1: Dimensiones de prototipo y modelo

	Prototipo	Modelo
Diámetro del tubo	60 cm	8.8 cm
Base de canal de salida	130 cm	19 cm
Altura de caída de descarga	15 cm	2.2 cm

3. Luego, con la escala definida, se procedió a calcular mediante semejanza hidráulica la pendiente con la que se deberá instalar el tubo de descarga para recrear las condiciones de campo.
- a. Partiendo de la expresión de Manning para velocidad:

$$V = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S^{1/2}$$

- b. Asumiendo que el número de Froude es el mismo tanto para el modelo como para el prototipo, se tiene:

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

- c. Reemplazando la expresión de Manning mostrada en el punto “a”, en la igualdad del punto “b”:

$$\frac{\frac{1}{n_p} \times R_p^{2/3} \times s_p^{1/2}}{\sqrt{g_p \times L_p}} = \frac{\frac{1}{n_m} \times R_m^{2/3} \times s_m^{1/2}}{\sqrt{g_m \times L_m}}$$

- d. Considerando que la aceleración de la gravedad es la misma para ambos y simplificando el radio hidráulico a unidades de longitud, se tiene:

$$\frac{\frac{1}{n_p} \times L_p^{2/3} \times s_p^{1/2}}{\sqrt{L_p}} = \frac{\frac{1}{n_m} \times L_m^{2/3} \times s_m^{1/2}}{\sqrt{L_m}}$$

- e. Luego de la simplificación realizada, se obtiene la siguiente relación para obtener la pendiente con la cual se deberá instalar el tubo para simular las condiciones reales de circulación de flujo.

$$(s_r)^{1/2} = \left(\frac{1}{L_r}\right)^{1/6} \times n_r$$

- f. Considerando que la rugosidad es la misma en ambos casos, en el modelo y en el prototipo, esta se simplifica, obteniendo finalmente:

$$(s_r)^{1/2} = \left(\frac{1}{L_r}\right)^{1/6}$$

$$s_m = s_p \times \left(\frac{L_p^{1/6}}{L_m}\right)^2$$

- g. Remplazando en esta expresión los valores determinados de pendiente y escala se tiene:

$$s_m = 0.020 \times \left(\frac{6.8^{1/6}}{1}\right)^2$$

$$s_m = 0.038$$

Con esta pendiente obtenida, se verificará si las condiciones del laboratorio (longitud y altura de canal) permiten la instalación del tubo de descarga

$$0.038 = \frac{H_{canal}}{L_{canal}} = \frac{0.53}{L_{canal}}$$

$$L_{canal} = 14.09 \text{ m}$$

- h. La longitud hallada a la longitud del canal del laboratorio, por lo que se planteó modelar una pendiente de $s_p = 0.03$, el cual representa un escenario conservador:

$$s_m = 0.030 \times \left(\frac{6.8^{1/6}}{1} \right)^2$$

$$s_m = 0.0568$$

Verificando si las condiciones del laboratorio permiten la instalación del tubo de descarga

$$0.0568 = \frac{H_{canal}}{L_{canal}} = \frac{0.53}{L_{canal}}$$

$$L_{canal} = 9.29 \text{ m}$$

Longitud que puede ser instalada en el canal del laboratorio

4. Para saber a qué altura debía de ubicarse el tubo de descarga, se considera que esta trabajará como orificio, por lo cual haciendo uso de la expresión mostrada en Ingeniería de los Recursos Hidráulicos (Linsley y Franzini 1970) se obtuvo:
- a. De acuerdo al texto en mención, la carga de agua sobre un tubo que se encuentra sumergido con control en la entrada y que funciona como orificio se define según la siguiente ecuación:

$$h = \frac{1}{C_d^2} \frac{Q^2}{2g \times A^2}$$

Donde:

- h : Carga de agua medida sobre el centro del orificio del tubo.
 C_d^2 : Coeficiente de descarga del orificio.
 Q : Caudal de descarga.
 A : Área de la sección del tubo.
 g : Aceleración de la gravedad.

- b. A continuación se muestra el caudal “ Q_m ” obtenido para el modelo del cálculo de semejanza hidráulica y el área “ A_m ” a utilizar calculada con el diámetro de tubo ya escalado para este modelo.

$$Q_m = 0.005 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_m = \frac{\pi \times D^2}{4} = 6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

- c. Es importante mencionar que el valor de “ C_d ” que se utilizó fue 0.62, debido a que la entrada del tubo posee bordes agudos. Reemplazando estos valores en la ecuación planteada inicialmente:

$$h_m = \frac{1}{0.62^2} \frac{(0.005 \text{ m}^3/\text{s})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times (6 \times 10^{-3} \text{ m}^2)^2}$$

$$h_m = 0.092 \text{ m}$$

- d. Como se mencionó anteriormente, el valor obtenido mide la carga de agua sobre el centro del orificio, por lo cual la carga de agua sobre el tubo del modelo “ h_{w2} ” se calculó de la siguiente forma:

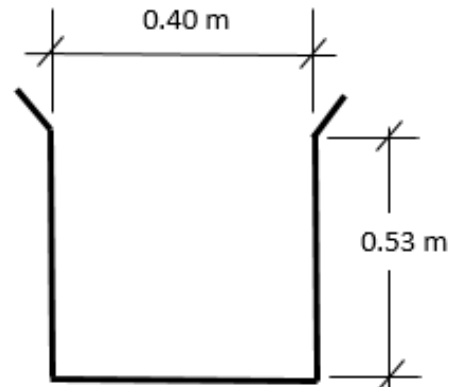
$$h_{w2} = 0.092 \text{ m} - 0.044 \text{ m} - 0.006 \text{ m} \text{ (espesor de la pared de la tubería)} = 0.042 \text{ m}$$

5. Siendo el desnivel entre el punto de descarga del tubo y el fondo de canal la altura de caída en el prototipo “ h_{c_p} ” (0.15 m), en el modelo físico este sería:

$$h_{c_m} = 0.15 \text{ m} \div 6.8 = 0.022 \text{ m}$$

6. Con los valores calculados de diámetro del tubo de descarga, carga sobre este, altura de caída y considerando un borde libre de 0.228 m (estimado para obtener un valor entero entre el punto de entrada al tubo de descarga y el punto de salida), se obtiene la altura “ ht_m ” la cual representa la altura a la cual se encuentra la parte inferior del tubo de descarga con respecto al fondo del canal del laboratorio.

FIGURA N° 3: Dimensiones del canal del Laboratorio de Hidráulica de la PUCP



$$ht_m = \text{altura de canal} - \text{carga sobre el tubo} - \text{diámetro} - \text{borde libre}$$

$$ht_m = 0.53 \text{ m} - 0.042 - 0.088 - 0.228 = 0.172 \text{ m}$$

7. Con los valores obtenidos, la longitud horizontal que ocupará el tubo de descarga en el modelo se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta y = \text{altura de parte inferior de tubo a fondo de canal } (ht_m) - \text{altura de caída } (hc_m)$$

$$\Delta y = 0.172 \text{ m} - 0.022 \text{ m} = 0.15 \text{ m}$$

- a. La longitud de tubo de descarga deberá obedecer la pendiente calculada según la siguiente expresión:

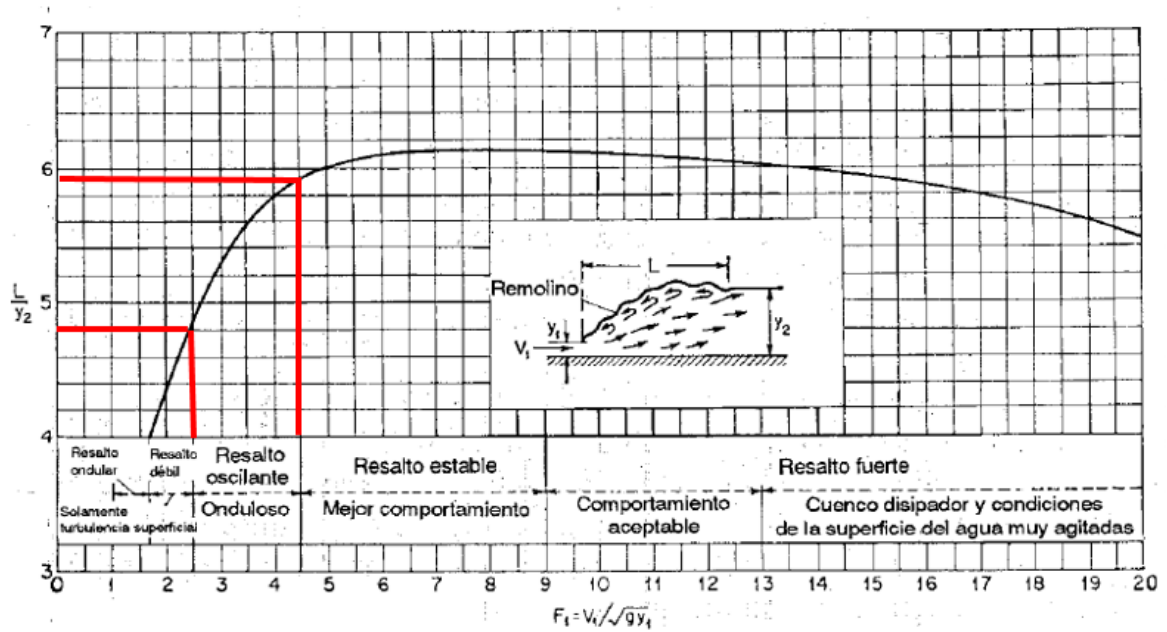
$$0.0568 = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{0.15}{\Delta x}$$

$$\Delta x = 2.639 \text{ m}$$

8. Debido a que en los ensayos a realizarse busca un flujo en régimen subcrítico, se espera observar un resalto hidráulico. Para la estimación de la longitud mínima que debe tener el canal de disipación, se asumió que la longitud del resalto se encontraría dentro del rango de valores de números de Froude "Fr₁" definidos para resaltos

ondulados, el cual se muestra en el libro Hidráulica de Canales Abiertos (Ven Te Chow 1994)

FIGURA N° 4: Estimación de longitud de resalto hidráulico



Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de Canales Abiertos*, Santa Fé de Bogotá. Pág. 390

Del gráfico se observa que para:

$$Fr'_{1m} = 2.5$$

- a. Se calcula el valor de “ y'_{1m} ” a partir de la expresión del número de Froude.

$$Fr'_{1m} = \frac{V_{1m}'}{\sqrt{g \times y'_{1m}}} = \frac{\frac{Q_m}{b_m \times y'_{1m}}}{\sqrt{g \times y'_{1m}}}$$

$$2.5 = \frac{\frac{0.005 \text{ m}^3/\text{s}}{0.19 \text{ m} \times y'_1}}{\sqrt{9.81 \text{ m}^2/\text{s} \times y'_1}}$$

$$y'_{1m} = 0.022 \text{ m}$$

- b. Con el valor de “ y'_{1m} ” y “ Fr'_{1m} ” se calcula de “ y'_{2m} ”, a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{y'_{2m}}{y'_{1m}} = \frac{1}{2} \times \left(\sqrt{1 + 8 \times Fr'_{1m}{}^2} - 1 \right)$$

$$y'_{2m} = 0.068 \text{ m}$$

- c. Con el valor de “ y_{2m} ” calculado, procederemos a calcular la longitud “ L'_m ” de resalto en el modelo:

$$\frac{L'_m}{y'_{2m}} = 4.8$$

$$L'_m = 0.33 \text{ m}$$

- d. Realizando el mismo procedimiento de cálculo para el $Fr''_{1m} = 4.5$, se calcula los valores de “ y''_{1m} ”, “ y''_{2m} ” y la longitud de resalto “ L''_m ”,

$$y''_1 = 0.015 \text{ m}$$

$$y''_2 = 0.089 \text{ m}$$

$$L''_m = 0.40 \text{ m}$$

De los resultados obtenidos, se estima que la longitud del resalto hidráulico “ L_m ” se encuentre entre los valores 0.33 m y 0.40 m.

9. Además, a la longitud estimada de resalto, se le debe adicionar la longitud a la cual llegará el chorro, como se muestra a continuación
- a. Para este propósito se asumió un desplazamiento parabólico, donde el desplazamiento horizontal está definido por un movimiento rectilíneo uniforme, para el cual se utilizó las ecuaciones que rigen este tipo de movimiento.

Desplazamiento horizontal:

$$x_m = V_{0m} \times t$$

$$x_m = (V_0 \cos \alpha) \times t$$

Desplazamiento vertical:

$$hc_m = V_{0m} \sin \alpha_m \times t + \frac{g \times t^2}{2}$$

Definimos las variables de las ecuaciones mostradas:

x_m : Longitud de caída de chorro

α_m : Ángulo de inclinación del tubo del modelo

hc_m : Altura de caída del chorro.

V_{0m} : Velocidad del flujo en el tubo del modelo.

g : Aceleración de la gravedad.

t : Tiempo

- b. A partir del valor obtenido para la pendiente del tubo, podemos calcular el ángulo de inclinación " α_m ".

$$\alpha_m = 3.26^\circ$$

- c. El cálculo de la velocidad del flujo en el tubo, se realizó siguiendo el procedimiento mostrado en el libro Mecánica de Fluidos 2 (Cherequé 1987),

$$V_{0m} = 1.96 \text{ m/s}$$

$$hc_m = 0.0220 \text{ m}$$

$$\alpha_m = 3.26^\circ$$

- d. De la ecuación de desplazamiento horizontal se despeja el tiempo:

$$t = \frac{x_m}{(V_{0m} \cos \alpha_m)}$$

- e. Reemplazando la variable "t" en la ecuación de desplazamiento vertical:

$$hc_m = x_m \tan \alpha_m + \frac{g}{2} \times \left(\frac{x_m}{(V_0 \cos \alpha_m)} \right)^2$$

f. Reemplazando los valores de cada variable:

$$0.022 \text{ m} = x_m \tan 3.26^\circ + \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{2} \times \left(\frac{x}{1.960 \text{ m/s} \times \cos 3.26^\circ} \right)^2$$

g. Resolviendo esta ecuación se obtiene el valor de longitud de caída de chorro " x_m ":

$$x_m = 0.077 \text{ m}$$

Adicionando este resultado de longitud de caída de chorro a la longitud del resalto hidráulico, el rango de valores para la longitud del canal de disipación varía entre 0.41m y 0.48 m.

Considerando a que se ensayará diferentes alternativas de solución en el modelo físico, se construirá un canal de disipación de 1.5 m longitud, cubriendo con esta la longitud de resalto estimada y la longitud de caída de chorro.

10. Finalmente, para estimar el rango de los coeficientes de rugosidad de Manning para el fondo del canal a ensayar, se consideró la rugosidad de los materiales disponibles en campo que puedan ser utilizados en el prototipo, desde $n=0.009$ (fibra de vidrio) hasta $n=0.032$ (grouted riprap). A continuación se muestra el cálculo de rugosidad absoluta para el modelo.

a. A partir de la semejanza hidráulica, asumiendo que el valor del número de Froude, tanto en el modelo como en el prototipo es el mismo, se procedió de la siguiente forma.

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

b. En esta ecuación, al remplazar la velocidad por la expresión de velocidad de Chezy, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{C_p \times \sqrt{R_p \times S_p}}{\sqrt{g_p \times L_p}} = \frac{C_m \times \sqrt{R_m \times S_m}}{\sqrt{g_m \times L_m}}$$

c. Considerando que el valor de la aceleración de la gravedad y la pendiente hidráulica es la misma para el prototipo como para el modelo, se tiene:

$$C_p \times \frac{R_p^{0.5}}{R_m^{0.5}} = C_m \times \frac{L_p^{0.5}}{L_m^{0.5}}$$

Simplificando ambas relaciones se obtuvo finalmente:

$$C_p = C_m$$

Como se puede observar en el resultado obtenido, el coeficiente de Chezy “C” del modelo y del prototipo es el mismo,

- d. Asumiendo que el flujo en el canal tiene fronteras hidráulicamente rugosas, para el cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning “n” se utilizará la siguiente relación:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n}$$

- e. Reemplazando esta expresión en la igualdad hallada entre el coeficiente de Chezy “C” del modelo y del prototipo, se tiene

$$C_p = C_m$$

$$\frac{R_m^{1/6}}{n_m} = \frac{R_p^{1/6}}{n_p}$$

$$\frac{n_p}{n_m} = \frac{R_p^{1/6}}{R_m^{1/6}} = 6.8^{1/6}$$

$$n_m = \frac{n_p}{6.8^{1/6}}$$

A partir de esta relación, y considerando el mayor valor hallado para el tirante conjugado $y''_2 = 0.089 \text{ m}$ calculado en el punto 8 de esta sección, se calcula el coeficiente de rugosidad de Manning para el modelo y su respectivo coeficiente “C” de Chezy.

$$n_p = 0.009 \quad \text{se tiene un} \quad n'_m = 0.0065; C' = 92.07$$

$$n_p = 0.032 \quad \text{se tiene un} \quad n''_m = 0.023; C'' = 26.02$$

- f. Para hallar la rugosidad absoluta relacionada a cada uno de estos valores, se hace uso de la expresión de la ecuación presentada en el libro “Hidráulica de Tuberías y Canales” (Rocha 2007), la cual se desarrollará en el punto 7.1 de este documento

$$C = 18 \times \log \frac{12R_m}{K_m}$$

Siendo

K_m : Rugosidad absoluta.

R_m : Radio hidráulico.

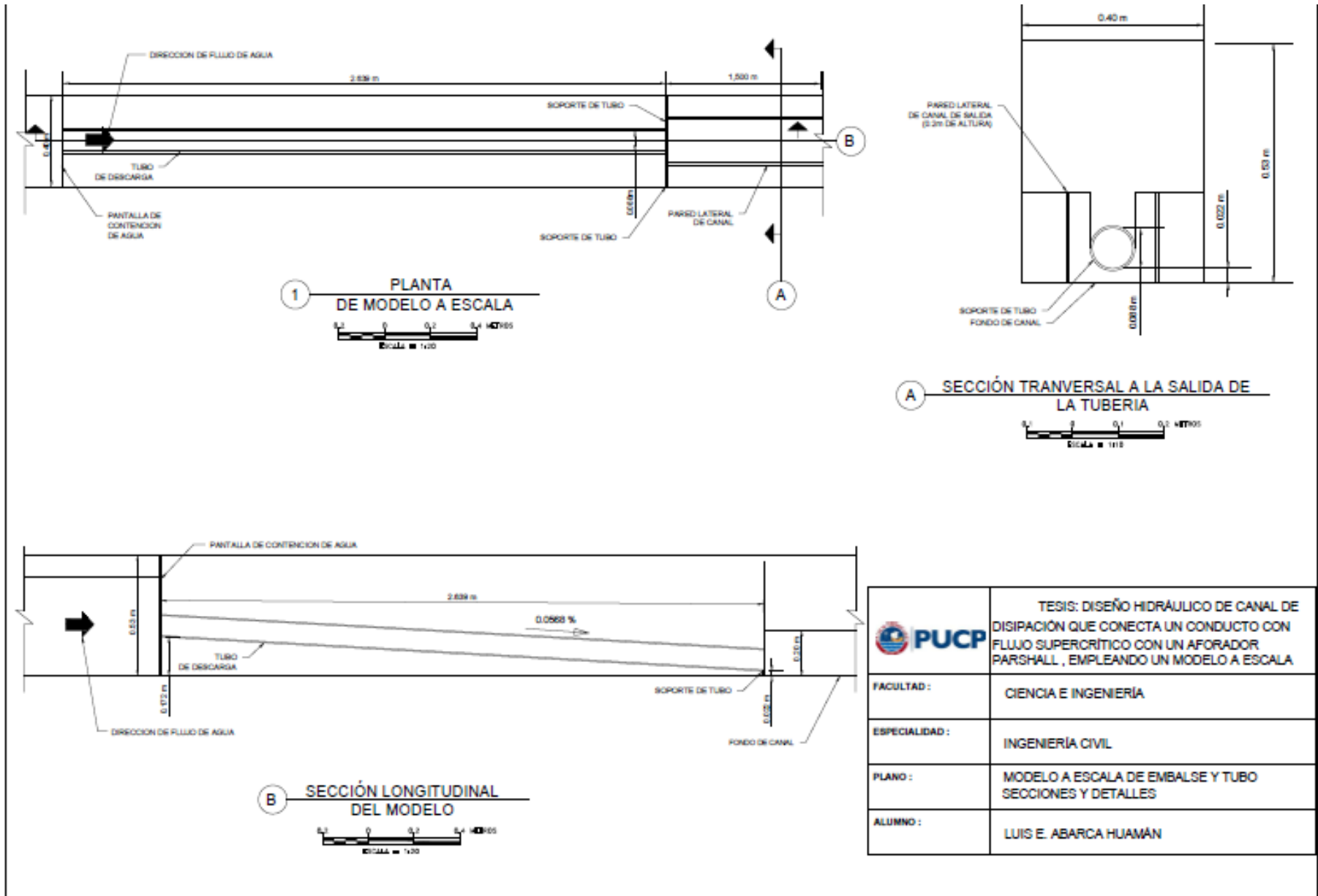
Para $C' = 92.07$ se tiene $K'_m = 4.16 \times 10^{-6} m$

Para $C'' = 92.07$ se tiene $K''_m = 0.0198 m$

De los resultados obtenidos, se obtiene que el rango de valores de rugosidad absoluta “ K_m ” que podemos utilizar en los ensayos, varía entre $4.16 \times 10^{-6} m$ y $0.0198 m$.

La Figura 5 muestra el plano elaborado para la construcción del modelo.

FIGURA N° 5: Plano para construcción de modelo físico

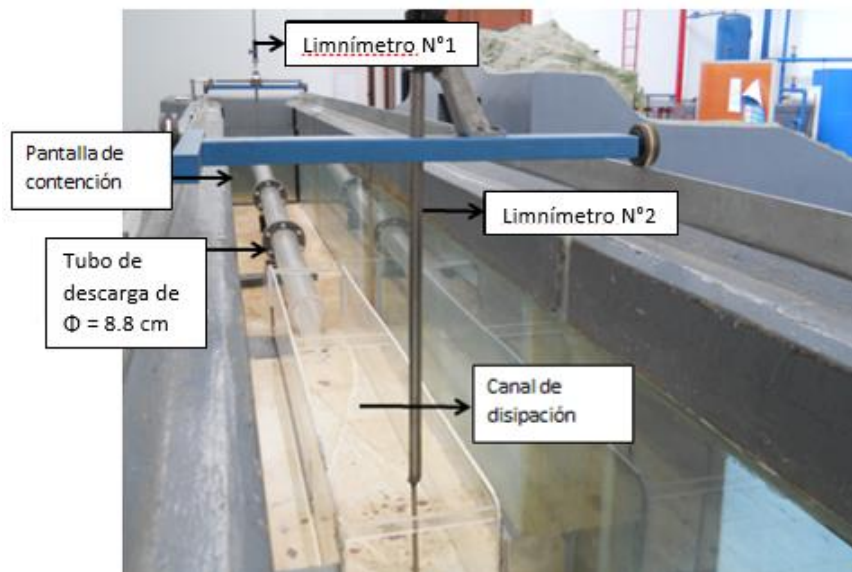


CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN E INSTALACIÓN DE MODELO EN LABORATORIO

A continuación se muestra el modelo físico instalado en el laboratorio. Cabe mencionar que todas las fotos presentadas en esta sección y en las subsiguientes fueron tomadas el 31 de agosto de 2012.

FIGURA N° 6: Modelo físico para ensayos



Las diferentes partes que conforman el modelo se describen a continuación:

- 1.- Pantalla de contención de agua hecha de material acrílico, con un espesor de 0.6 cm.
- 2.- Tubo de descarga de 8.8 cm de diámetro hecho de material acrílico de 0.6 cm de espesor, transparente y de una longitud de 263.9 cm, fue fabricado en tres partes que luego fueron unidas mediante bridas.
- 3.- Canal de disipación hecho de material acrílico. Este canal cuenta con 19 cm de base, 20 cm de altura y 150 cm de longitud.
- 4.- Dos limnímetros. El limnómetro N°1 fue usado para realizar mediciones en el embalse de agua y el limnómetro N°2 para medir tirantes en el canal de disipación.

A continuación se procederá a describir el procedimiento de instalación del modelo físico.

- Primero se colocó la pantalla de contención de agua, ubicada a medio metro del inicio del canal. Esta fue adherida a las paredes laterales, hechas de vidrio, del canal haciendo uso de silicona.
- Luego se procedió a colocar el apoyo inferior del tubo de descarga, ubicado al inicio del canal de disipación del modelo, el cual también fue adherido a las paredes del canal usando silicona.
- Después se procedió a unir los tres tramos de tubo mediante bridas, para luego proceder a apoyarlo como un solo elemento en la pantalla de contención y en el apoyo inferior siguiendo el eje central del canal. Este fue adherido a ambos apoyos haciendo uso de silicona
- Finalmente se colocó el canal de disipación, el cual también fue adherido a la base de concreto del canal (adherida con silicona) para que no se desplazara al momento que se empieza a realizar los experimentos

Es importante mencionar que el agua que se conduce a través del sistema, proviene de un tanque que se encuentra instalado en el laboratorio. Esta es bombeada, y a través de un sistema de tuberías llega al canal donde se encuentra instalado el modelo. Para controlar el caudal que se está suministrando al sistema, en la tubería principal se encuentra instalado un caudalímetro, el cual nos indica el caudal en litros por segundo (l/s) que pasa a través de la tubería.

CAPÍTULO V

DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

A continuación se describe los diferentes ensayos realizados con el modelo físico, los cuales han sido registrados en videos y se podrán revisar en el Anexo 3. Previo al inicio de estos se realizó las mediciones de los niveles que se tomarán como referencia. Para las mediciones con el limnómetro N°1 se toma como referencia el fondo del canal de concreto de la infraestructura propia del laboratorio, y para las mediciones realizadas con el limnómetro N°2, el fondo del canal del modelo.

5.1. Nivel de agua a la entrada del tubo de descarga

Una vez instalado el modelo se procedió a encender la bomba, para luego proceder a abrir lentamente la válvula de alimentación hasta que el caudalímetro marque 5 l/s. El agua bombeada es contenida por la pantalla de acrílico hasta llegar a un equilibrio entre el aporte de caudal al sistema y la descarga del mismo a través del tubo donde el nivel de agua permanece constante. La Figura N° 7 muestra el perfil de la carga hidráulica sobre el tubo de descarga.

FIGURA N° 7: Perfil de carga hidráulica sobre el tubo de descarga

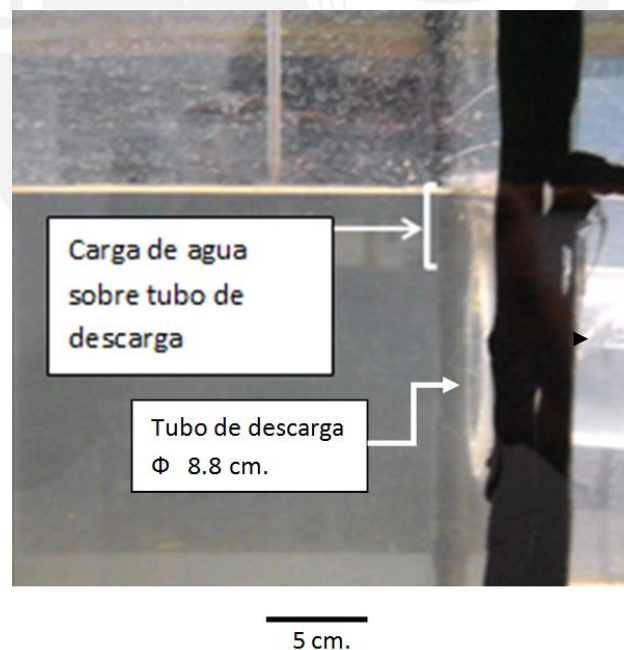
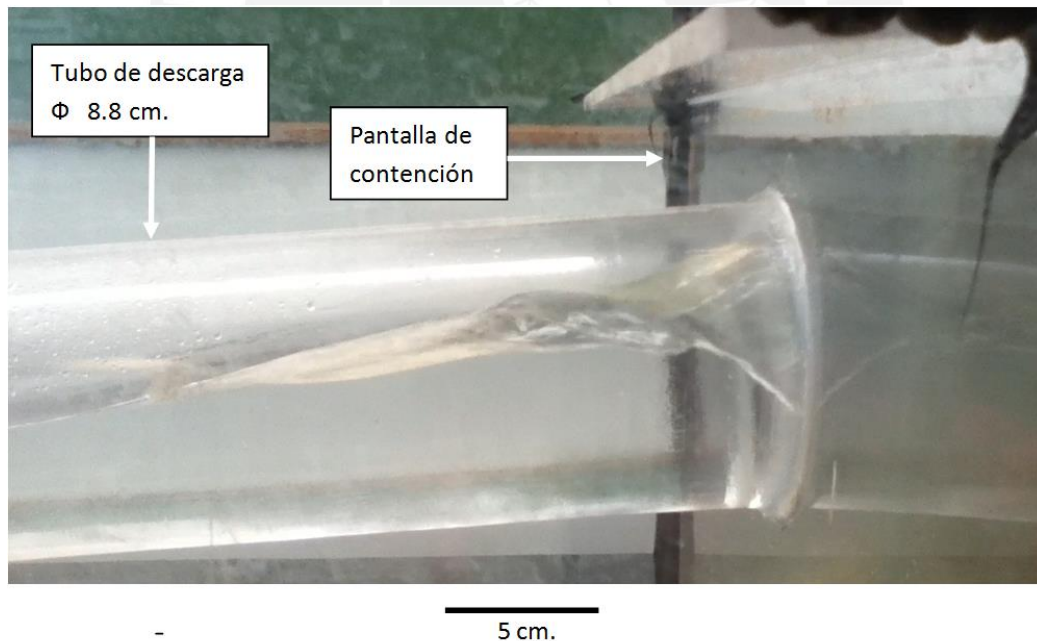


FIGURA N° 8: Vista de ingreso de flujo a través del tubo de descarga

Una vez que el nivel de agua quede estable, se procedió a medir con el limnímetro N°1 el nivel de agua y luego se filmó la forma de descarga del agua almacenada a través del tubo para tener un registro de este. El perfil de la descarga de flujo a través del tubo se muestra en la Figura 9, el cual muestra que este trabaja como canal y no a tubo lleno.

FIGURA N° 9: Perfil del flujo de descarga a través del tubo de descarga

5.2. Flujo en canal con base de rugosidad baja

En la Figura N°10 se muestra la base de acrílico del canal de disipación, la cual denominaremos “base de rugosidad baja”.

FIGURA N° 10: Canal con base de rugosidad baja

Para el ensayo, una vez que se encendió el sistema y el nivel de agua se estabilizó en el embalse, con el limnómetro N°2 se procedió a realizar las siguientes mediciones:

1. Se midió el tirante de agua a la salida del tubo.
2. Con una regla horizontal, instalada en la pared del canal de disipación, se midió la distancia a la cual la parte inferior del chorro llegó a impactar con la base del canal de disipación, tomando como cero el inicio del mismo.
3. Luego se procedió a medir el tirante de agua a 25, 50, 75, 100 y 150 cm. del inicio del canal de disipación. Estas distancias fueron escogidas debido a que en estas se observaba variaciones en el perfil del flujo.
4. Finalmente se filmó tanto de perfil como en planta para tener un registro del experimento. Estos archivos se encuentran adjuntos en el CD anexo.

5.3. Flujo en canal de disipación con base de rugosidad media

En la Figura N°11 se muestra el ensayo realizado utilizando una base de vidrio revestido con lija #80, la cual denominaremos “base de rugosidad media”.

FIGURA N° 11: Vista general de canal con base de rugosidad media



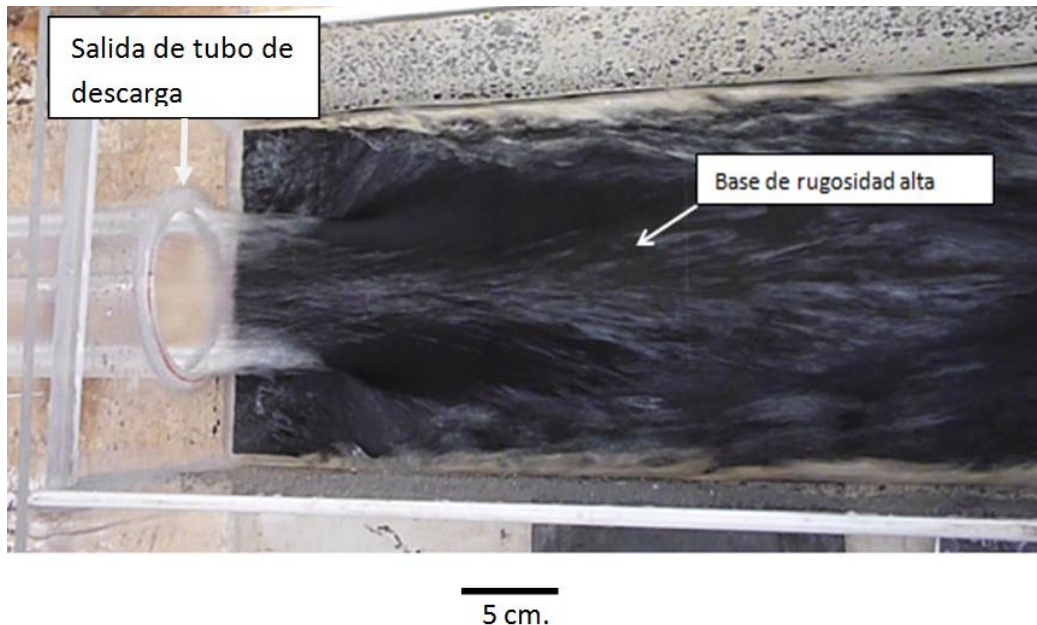
En este ensayo se evaluó el efecto que tiene en el tirante del flujo la rugosidad de la base del canal y si se podría llegar a un flujo de régimen subcrítico con esta. Primero se procedió a colocar la base de vidrio revestido con lija #80 dentro del canal de disipación, y para evitar que esta deslice debido a la inercia del flujo se colocó un tope al final del canal. Luego, una vez encendido el sistema y el nivel de agua se estabilizó en el embalse, se procedió a realizar las siguientes mediciones:

1. Se midió el tirante de agua a la salida del tubo.
2. Con una regla horizontal, instalada en la pared del canal de disipación, se midió la distancia a la cual la parte inferior del chorro llegó a impactar con la base del canal de disipación, tomando como cero el inicio del mismo.
3. Luego se procedió a medir el tirante de agua a 25, 50, 75, 100 y 150 cm. del inicio del canal de disipación.
4. Finalmente se filmó tanto de perfil como en planta para tener un registro del experimento. Estos archivos se encuentran adjuntos en el CD anexo.

5.4. Flujo en canal de disipación con base de rugosidad alta

En la Figura N° 12 se muestra el ensayo realizado utilizando una base de vidrio revestido con lija #40, la cual denominaremos “base de rugosidad alta”.

FIGURA N° 12: Canal con base de rugosidad alta



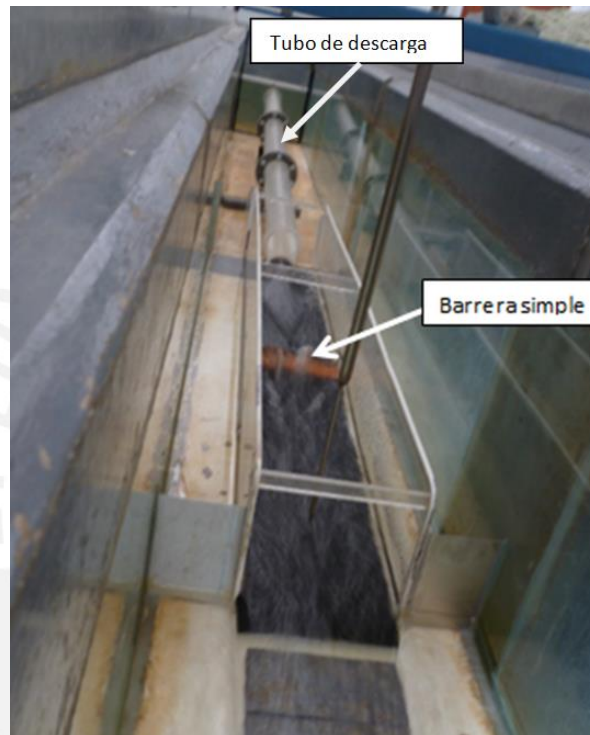
En este ensayo, al igual que el mencionado en el punto 5.3, se evaluó el efecto que tiene en el tirante del flujo la rugosidad de la base del canal. Una vez instalada la base, se procedió a encender la bomba y abrir la válvula hasta que el caudalímetro marque los 5 l/s. Cuando el nivel de agua se estabilizó en el embalse, se procedió a realizar el ensayo de la siguiente manera:

1. Se midió el tirante de agua a la salida del tubo.
2. Con una regla horizontal, instalada en la pared del canal de disipación, se midió la distancia a la cual la parte inferior del chorro llega a impactar con la base del canal de disipación, tomando como cero el inicio del mismo.
3. Luego se procedió a medir el tirante de agua a 25, 50, 75, 100 y 150 cm. del inicio del canal de disipación.
4. Finalmente se filmó tanto de perfil como en planta, para tener un registro del experimento. Estos archivos se encuentran adjuntos en el CD anexo.

5.5. Barrera simple en el canal de disipación con base de rugosidad media

En la Figura N°13 se muestra el ensayo realizado utilizando una barrera hecha de loseta cerámica de forma rectangular, la cual denominaremos “barrera simple”. Esta tiene una altura de 1.5 cm. y se apoya sobre la base de rugosidad media.

FIGURA N° 13: Vista general de flujo utilizando barrera simple sobre canal de rugosidad media



Este ensayo se puede considerar una continuación del descrito en el punto 5.3, ya que para este no se removió la base de rugosidad media del canal de disipación, ni se apagó la bomba. En este ensayo se colocó una barrera en todo el ancho del canal de disipación, utilizándola como disipador de energía, con el fin de analizar el impacto que tiene la misma en el flujo de acuerdo a su ubicación respecto al inicio del canal de disipación (a 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63 y 70 cm). Para este fin se procedió de la siguiente manera:

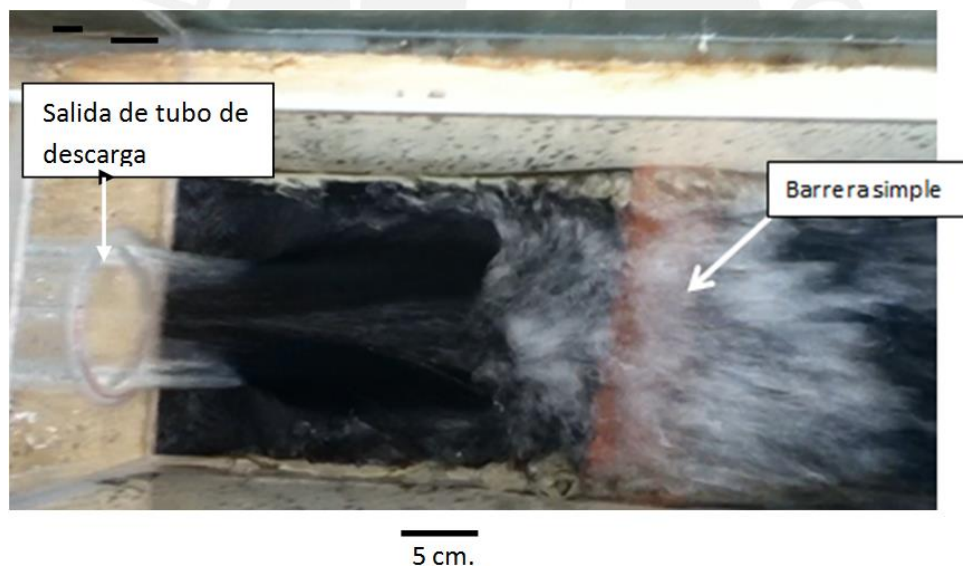
1. Primero se procedió a colocar la barrera simple de manera perpendicular al flujo, cubriendo el ancho del canal de disipación, siendo sujeta en sus extremos laterales para que no sea arrastrada por el flujo.

2. Después, para cada ubicación de la barrera simple, se tomó la medición en el punto más alto del flujo sobre la barrera.
3. Luego se midió la distancia a la cual el flujo de considera como desarrollado.
4. Para continuar con el ensayo, se midió el tirante del flujo en el canal de disipación a 25, 50, 75, 100 y 150 cm. del inicio del mismo, si es que la ubicación del dissipador lo permitía.
5. Finalmente se procedió a filmar de perfil y en planta los ensayos realizados para cada ubicación de la barrera simple y así tener un registro del experimento. Estos archivos se encuentran adjuntos en el CD anexo.

5.6. Barrera simple en el canal de disipación con base de rugosidad alta

En la Figura N° 14 se muestra el ensayo realizado utilizando una barrera, que es la misma que se utilizó para el ensayo presentado en el punto 5.5. A diferencia del ensayo presentado en el punto anterior, esta se apoya sobre la base de rugosidad alta.

FIGURA N° 14: Vista de planta de barrera simple sobre canal de rugosidad alta



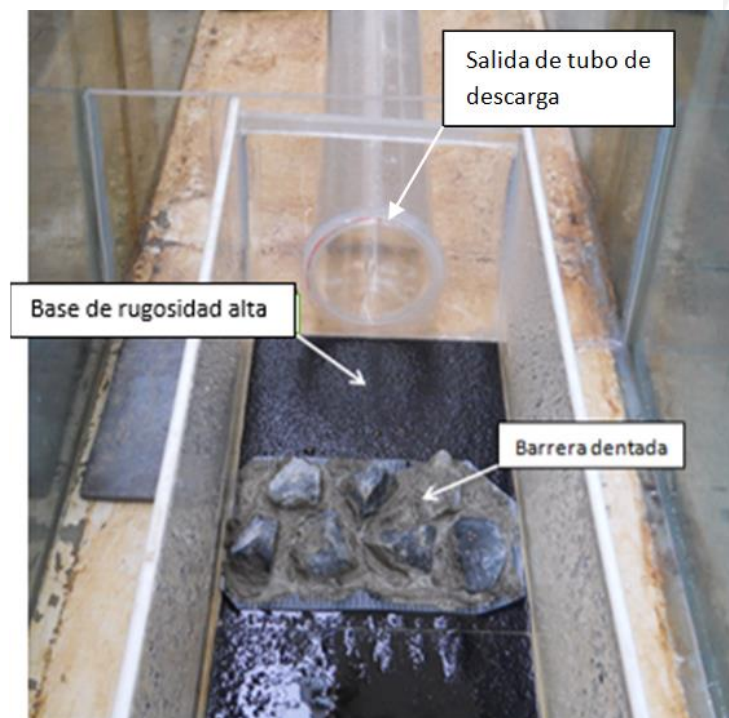
Este ensayo se puede considerar una continuación del descrito en el punto 5.4, ya que para este no se removió la base de rugosidad alta del canal de disipación, ni se apagó la bomba. En este ensayo se colocó una barrera en todo el ancho del canal de disipación, utilizándola como dissipador de energía, con el fin de analizar el impacto que tiene la misma en el flujo de acuerdo a su ubicación respecto al inicio del canal de disipación (a 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63 y 70 cm). Para este fin se procedió de la siguiente manera:

1. Primero se procedió a colocar la barrera simple de manera perpendicular al flujo, cubriendo el ancho del canal de disipación, siendo sujeta en sus extremos laterales para que no sea arrastrada por el flujo.
2. Después, para cada ubicación de la barrera simple, se tomó la medición en el punto más alto del flujo sobre la barrera.
3. Luego se midió la distancia en la que el flujo alcanza a ser desarrollado.
4. Para continuar con el ensayo, se midió el tirante del flujo en el canal de disipación a 25, 50, 75, 100 y 150 cm. del inicio del mismo, si es que la ubicación del disipador lo permitía.
5. Finalmente se procedió a filmar de perfil y la planta de los ensayos realizados para cada ubicación de la barrera simple y así tener un registro del experimento. Estos archivos se encuentran adjuntos en el CD anexo.

5.7. Barrera dentada en el canal de disipación con base rugosidad alta.

En la Figura N° 15 se muestra el ensayo realizado utilizando una barrera hecha de piedras la cual denominaremos “barrera dentada”, la cual se apoya sobre la base de rugosidad alta.

FIGURA N° 15: Barrera dentada sobre canal de rugosidad alta



En este ensayo se utilizó un elemento disipador diferente para analizar su influencia en el flujo y comparar los resultados con los obtenidos en los ensayos descritos en los puntos anteriores. Este disipador consiste en piedras de 3 cm de alto, las cuales están unidas a una base rugosa de plástico haciendo uso de un mortero, como se observa en la Figura N°15.

Para este ensayo, una vez instalada la base de rugosidad alta en el canal de disipación, se encendió el sistema y cuando el nivel de agua se estabilizó en el embalse, se procedió de la siguiente manera:

1. Primero se procedió a colocar el disipador a 42 cm del inicio del canal de disipación, debido a que en los ensayos anteriores se observó que a en esta ubicación se obtienen mejores resultados (tirantes más altos).
2. Después se tomó la medición en el punto más alto del flujo sobre la barrera.
3. Luego se midió la distancia en la que el flujo alcanza a ser desarrollado.
4. Para continuar con el ensayo, se midió el tirante del flujo en el canal de disipación a 25, 50, 75, 100 y 150 cm. del inicio del mismo, si es que la ubicación del disipador lo permitía.
5. Finalmente se procedió a filmar de perfil y la planta del ensayo realizado para tener un registro del experimento. Estos archivos se encuentran adjuntos en el CD anexo.

5.8. Barrera empedrada en el canal de disipación con base de rugosidad alta

En la Figura N°16 se muestra la barrera hecha de piedras embebidas en cemento, la cual denominaremos “barrera empedrada”. Esta tiene una altura de 2 cm y se apoya sobre la base de rugosidad alta.

FIGURA N° 16: Barrera empedrada



Al igual que en el ensayo anterior, en este se utilizó un elemento disipador diferente para analizar su influencia en el flujo y comparar los resultados con los obtenidos en los ensayos descritos en los puntos anteriores. La barrera empedrada es similar a la barrera simple utilizada anteriormente, la diferencia es que este es una barrera de más áspera e irregular que también cubrirá todo el ancho del canal.

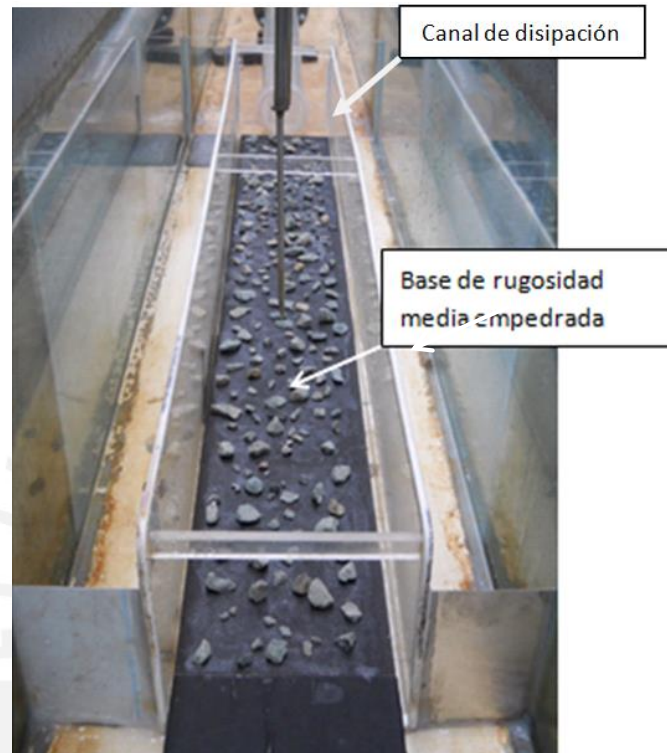
En este ensayo, una vez instalada la base se encendió el sistema y una vez que el nivel de agua se estabilizó en el embalse, se procedió de la siguiente manera:

1. Primero se procedió a colocar el disipador a 42 cm del inicio del canal de disipación, debido a que en los ensayos anteriores se observó que en esta ubicación se obtienen mejores resultados (tirantes más altos).
2. Después se tomó la medición en el punto más alto del flujo sobre la barrera.
3. Luego se midió la distancia en la que el flujo alcanza a ser desarrollado.
4. Para continuar con el ensayo, se midió el tirante del flujo en el canal de disipación a 25, 50, 75, 100 y 150 cm. del inicio del mismo, si es que la ubicación del disipador lo permitía.
5. Finalmente se procedió a filmar de perfil y la planta del ensayo realizado para tener un registro del experimento. Estos archivos se encuentran adjuntos en el CD anexo.

5.9. Flujo en canal de disipación con base empedrada

En la Figura N° 17 se muestra el canal de disipación en cuya base de rugosidad media se encuentran adheridas piedras de 0.93 cm de altura en promedio (las mediciones de estas se muestran en el Capítulo 7), la cual llamaremos “base empedrada”.

FIGURA N° 17: Canal de con base empedrada



En este ensayo se evaluó el comportamiento del flujo cuando este circula sobre una base revestida con lija #80 con piedras adheridas a él en toda su longitud. Una vez colocada la base empedrada dentro del canal de disipación se encendió el sistema y cuando el nivel de agua se estabilizó en el embalse, se procedió de la siguiente manera:

1. Primero se midió el tirante de agua a la salida del tubo.
2. Con una regla horizontal, instalada en la pared del canal de disipación, se midió la distancia a la cual la parte inferior del chorro llega a impactar con la base del canal de disipación, tomando como cero el inicio del mismo.
3. Dado que en el perfil del flujo se observó un resalto hidráulico, se procedió a medir los tirantes conjugados.
4. Después, con la regla horizontal instalada, se midió la longitud del resalto hidráulico.
5. Finalmente se procedió a filmar de perfil y la planta del ensayo realizado para tener un registro del experimento. Estos archivos se encuentran adjuntos en el CD anexo.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y PRESENTACION DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MODELO

6.1. Cálculo del nivel de agua a la entrada del tubo de descarga y comparación con los resultados experimentales

El procedimiento de este ensayo se desarrolló en el punto 5.1. En el cual se pudo observar que una vez que el nivel de agua se estabilizó a la entrada del tubo, este se encontraba sumergido, por lo que se puede afirmar que trabajaba con control a la entrada y funcionaba como un orificio. A continuación se presenta las mediciones experimentales de carga sobre el tubo, las cuales serán comparadas con valores calculados según procedimientos matemáticos indicados por el Hydraulic Design of Highway Culverts (Norman et al. 2001) y por Linsley y Franzini (1970)

a- Mediciones experimentales de carga sobre el tubo de descarga

En la siguiente tabla se muestra los valores experimentales medidos durante los ensayos realizados, los cuales representan la carga de agua sobre el tubo, medido a partir de la clave de este. Para una mejor presentación de las mediciones realizadas durante los ensayos, en esta sección y en las subsiguientes, serán presentadas en centímetros.

TABLA N° 2: Carga de agua sobre el tubo de descarga

Carga sobre el tubo (cm)
2.81
3.47
3.95

La media de estos valores medidos " h_{we} " será comparada con los resultados obtenidos matemáticamente en los siguientes puntos.

$$h_{we_m} = 3.41 \text{ cm}$$

b- Cálculo de carga de agua sobre el tubo de descarga según el Hydraulic Design of Highway Culverts (Norman et al. 2001)

Tomando como base la teoría descrita en este documento, para hallar la carga sobre el tubo cuando este se encuentra sumergido, se utilizó la ecuación mostrada en el “Apéndice A” del mismo, la cual se muestra a continuación:

$$\frac{H_{wi}}{D} = c \left[\frac{K_u Q}{AD^{0.5}} \right]^2 + Y - 0.5S^2$$

Donde:

H_{wi} : Carga sobre el tubo, medida a partir de la parte inferior de este.

D : Diámetro del tubo.

Q : Caudal de descarga.

A : Área de la sección del tubo.

s : Pendiente del tubo.

Y : Constante, extraída de la Tabla 9, chard 55.

c : Constante, extraída de la Tabla 9, chard 55.

K_u : Valor definido como 1.811 para el sistema internacional.

Tomando los valores obtenidos en la semejanza hidráulica, se tiene:

$$Q_m = 0.005 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_m = 0.088 \text{ m}$$

$$A_m = \frac{\pi \times D^2}{4} = 6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$s_m = 0.057$$

De acuerdo a lo referido en la página 192 del documento referido, para la aplicación de la fórmula indicada se debe cumplir la siguiente condición:

$$\frac{Q}{A \times D^{0.5}} > 2.21$$

Reemplazando los valores en esta ecuación:

$$\frac{0.005 \text{ m}^3/\text{s}}{6 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times (0.088 \text{ m})^{0.5}} = 2.77 > 2.21$$

Por otro lado, los valores considerados para los parámetros “ Y ” y “ c ” son los siguientes:

$$Y = 0.90$$

$$c = 0.021$$

Teniendo ya todos los valores definidos, procederemos a remplazar estos en la ecuación planteada inicialmente.

$$H_{wi} = 0.088 \text{ m} \times \{0.021 \times [1.811 \times 2.77]^2 + 0.90 - 0.5 \times 0.057^2\}$$

$$H_{wi_m} = 0.126 \text{ m}$$

Como se mencionó anteriormente, el valor obtenido representa la carga medida a partir de la parte inferior del tubo, por lo cual la carga de agua sobre este se estimaría de la siguiente forma:

$$h_{w1_m} = 0.126 \text{ m} - 0.088 \text{ m} - 0.006 \text{ m} (\text{espesor la pared de la tubería}) = 0.032 \text{ m}$$

c- *Cálculo de la altura de carga de agua sobre el tubo de descarga según el texto de Ingeniería de los Recursos Hidráulicos (Linsley y Franzini 1970)*

El cálculo de carga de agua sobre el tubo de acuerdo al texto en mención se muestra en el punto 4 del Capítulo III, donde se obtuvo que la carga de agua sobre el tubo " h_{w2_m} " es:

$$h_{w2_m} = 0.042 \text{ m}$$

La siguiente tabla muestra la comparación entre los valores obtenidos matemáticamente y experimentalmente:

TABLA N° 3: Comparación entre resultados experimentales y matemáticos

Resultado experimental	Resultado matemático	Variación
$h_{we_m} = 3.41 \times 10^{-2} \text{ m}$	$h_{w1_m} = 3.20 \times 10^{-2} \text{ m}$	-0.21cm = -6.1%
$h_{we_m} = 3.41 \times 10^{-2} \text{ m}$	$h_{w2_m} = 4.20 \times 10^{-2} \text{ m}$	0.79cm = +23%

Se puede observar mayor coincidencia con la fórmula planteada en el Hydraulic Design of Highway Culverts (Norman et al. 2001). Cabe decir que esta fórmula involucra más variables, permitiendo precisar el cálculo de la carga sobre el tubo de descarga. La fórmula planteada en Ingeniería de los Recursos Hidráulicos (Linsley y Franzini 1970), presenta de forma general la descarga de flujo de orificio.

6.2. Cálculo del tirante en el tubo de descarga y comparación con los resultados obtenidos experimentalmente

Durante los ensayos descritos en el Capítulo 5, se midió el tirante a la salida del tubo de descarga, haciendo uso del limnómetro N°2, con la finalidad de poder comparar el valor experimental con el valor obtenido a partir del cálculo matemático.

FIGURA N° 18: Tirante de flujo a la salida del tubo de descarga



En la siguiente tabla se muestra las condiciones iniciales consideradas para el cálculo matemático del tirante normal y velocidad del flujo en el tubo de descarga.

TABLA N° 4: Condiciones iniciales para el tubo de descarga

	Prototipo	Modelo
Caudal (m³/s)	0.60	0.005
Coefficiente de rugosidad de Manning (n)	0.009	0.009
Diámetro de tubo (m)	0.60	0.088
Pendiente (%)	0.03	0.057

El cálculo de la velocidad " V_{0m} " del flujo en el tubo del modelo y su tirante " y_{0m} ", se realizó de acuerdo al procedimiento mostrado en el libro Mecánica de Fluidos 2 (Cherequé 1987). En la Tabla N°5 se muestran los valores obtenidos para las variables presentadas en la Figura 19 y la velocidad " V_{0m} " calculada.

$$V_{0m} = \frac{s_m^{0.5} \times R_{0m}^{2/3}}{n_{0m}}$$

Donde

V_{0m} : Velocidad en el tubo (m/s).

s_m : Pendiente del tubo (%).

R_{0m} : Radio hidráulico (Definido como Área/Perímetro mojado).

n_{0m} : Coeficiente de rugosidad de Manning en el tubo.

Teniendo como dato conocido el caudal que circula a través del sistema, utilizaremos la relación:

$$Q_m = V \times A_{0m}$$

Donde:

Q_m : Caudal

A_{0m} : Área

Reemplazando la ecuación de velocidad en esta última, se tiene:

$$Q_m = \frac{s_m^{0.5} \times A_{0m}^{5/3}}{n_m \times P_m^{2/3}}$$

FIGURA N° 19: Cálculo del tirante en un canal circular

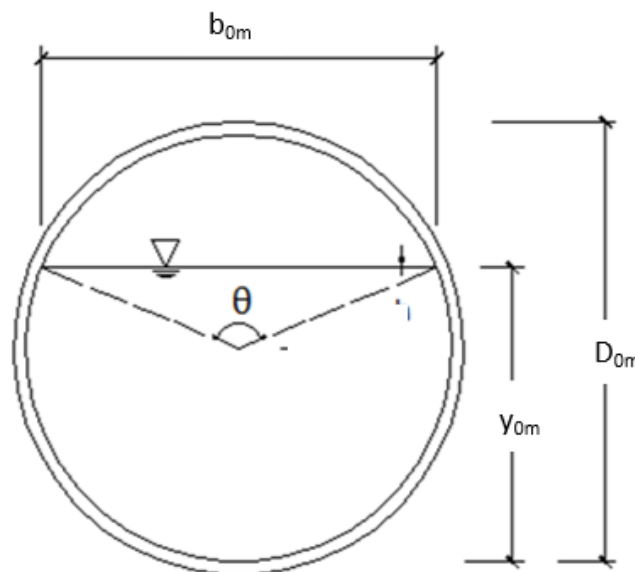


TABLA N° 5: Tirante y velocidad en el tubo de descarga

Diámetro D_{0m} (m)	0.088
Ángulo θ (rad)	3.40
Tirante y_{0m} (m)	0.038
Velocidad V_{0m} (m/s)	1.96

En la siguiente tabla se muestra la comparación entre los valores de tirante medidos experimentalmente y el obtenido según los cálculos matemáticos.

TABLA N° 6: Comparación de los resultados experimentales con los calculados

	y_{exp_m} (cm) - experimental	y_{0m} (cm) - calculado	Variación (%)
Ensayo A	3.73	3.80	1.84%
Ensayo B	3.69	3.80	2.89%

y_{0m} : Muestra el valor del tirante calculado matemáticamente.

y_{exp_m} : Muestra el valor del tirante obtenido experimentalmente.

Como se puede observar en la Tabla N°6, el valor del tirante obtenido experimentalmente presenta una diferencia promedio de +2.37% con respecto al valor de tirante calculado matemáticamente, lo cual puede deberse a errores humanos como: lectura en el limnómetro, falta de precisión en la lectura del caudalímetro, entre otros posibles factores.

6.3. Cálculo de longitud de caída del chorro de agua

Durante algunos de los ensayos descritos en el capítulo 5 se midió la distancia a la que la parte inferior del chorro impacta con el fondo del canal de disipación, como se muestra en la Figura 20.

FIGURA N° 20: Perfil de longitud de caída de chorro



Los valores obtenidos experimentalmente se muestran en la Tabla N°7, los cuales están definidos por la variable "X":

TABLA N° 7: Mediciones experimentales de longitud de caída de chorro

	X (cm)
Ensayo A	7.05
Ensayo B	7.04
Ensayo C	6.99
Ensayo D	6.95

Para comparar un solo valor medido experimentalmente con el calculado de forma matemática, se sacó un valor promedio de los valores obtenidos mostrados en la Tabla N°7.

$$X_{prom} = 7.01 \text{ cm}$$

Por otro lado, el procedimiento de cálculo matemático para hallar la distancia a la cual llega la caída del chorro se muestra desarrollado en el punto 9 del Capítulo III, en donde se obtuvo el valor de:

$$x_m = 0.077 \text{ m}$$

Se puede observar que el valor obtenido matemáticamente es mayor en +0.69 cm (8.5%) que el valor promedio medido experimentalmente.

6.4. Ensayos realizados con variación de rugosidad en el canal de disipación

A continuación se presenta los resultados experimentales del grupo de ensayos realizados considerando una variación de rugosidad en el fondo del canal de disipación, con la finalidad de obtener un flujo en régimen subcrítico.

6.4.1. Flujo en canal con base de rugosidad baja

En la siguiente tabla se presentan las mediciones experimentales realizadas para este ensayo, el cual es descrito en el punto 5.2.

TABLA N° 8: Mediciones experimentales de tirantes en el canal de rugosidad baja

Distancia de medición (cm)	Tirante (cm)
25	1.27
50	0.28
75	2.74
100	1.45
150	1.64

Para evaluar el tipo de régimen en el cual se encuentra el flujo se calculó el número de Froude para canales abiertos, para el cual se utilizó el tirante medido a los 150 cm de distancia del inicio del canal de disipación debido a que en este punto el flujo se encuentra desarrollado.

La ecuación de número de Froude se define como:

$$Fr_m = \frac{V_m}{\sqrt{g \times D_h}}$$

Donde:

V_m : Velocidad del flujo en el canal.

g : Aceleración de la gravedad.

D_h : Profundidad hidráulica.

A continuación se muestra el cálculo de las variables de la ecuación de número de Froude:

- Para el cálculo de la velocidad en el canal, se parte de la siguiente ecuación:

$$Q_m = V_m \times A_m$$

Donde el valor de “ Q_m ” ya se encuentra definido y el área “ A_m ” es calculada a partir del tirante medido:

$$0.005 \text{ m}^3/\text{s} = V_m \times (0.19\text{m} \times 0.0164\text{m})$$

$$V_m = 1.605 \text{ m/s}$$

- Para el cálculo de la profundidad hidráulica, se parte de la siguiente expresión:

$$D_h = \frac{A_m}{T_m}$$

Donde:

A_m : Área de la sección transversal del flujo (m^2).

T_m : Ancho de la lámina superficial del flujo (m).

Reemplazando los valores ya obtenidos anteriormente, se tiene:

$$D_h = \frac{0.19 \text{ m} \times 0.0164 \text{ m}}{0.19 \text{ m}}$$

$$D_h = 0.0164 \text{ m}$$

Finalmente, reemplazando los valores obtenidos en la expresión inicial se tiene:

$$Fr_m = \frac{1.605 \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.0164\text{m}}}$$

$$Fr_m = 4$$

Como se puede observar, el valor obtenido es mayor a la unidad, lo que indica que el flujo de agua se encuentra en régimen supercrítico; por lo cual, para cumplir con el

objetivo de esta tesis, en el siguiente ensayo se tuvo que optar por aumentar la rugosidad de la base del canal.

6.4.2. Flujo en canal con base de rugosidad media

En la siguiente tabla se presentan las mediciones experimentales realizadas para este ensayo, el cual es descrito en el punto 5.3.

TABLA N° 9: Mediciones experimentales de tirantes en el canal de rugosidad media

Distancia de medición (cm)	Tirante (cm)
25	1.57
50	1.12
75	2.89
100	1.82
150	1.88

Del mismo modo que en el procedimiento anterior, se consideró el tirante medido a 150 cm del inicio del canal de disipación. Del mismo modo como se realizó en el punto anterior, a continuación se muestra los cálculos realizados para obtener el número de Froude para este ensayo.

- Para el cálculo de la velocidad del flujo en el canal, se tiene:

$$0.005 \text{ m}^3/\text{s} = V_m \times (0.19\text{m} \times 0.0188\text{m})$$

$$V_m = 1.399 \text{ m/s}$$

- Para el cálculo de la profundidad hidráulica, se tiene:

$$D_h = 0.0188 \text{ m}$$

Finalmente, reemplazando los valores obtenidos en la ecuación de número de Froude, se tiene:

$$Fr_m = \frac{1.399 \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.0188 \text{ m}}}$$

$$Fr_m = 3.25$$

En este ensayo también se puede observar que el valor del número de Froude es mayor que la unidad, por lo cual el flujo aún se encuentra en régimen supercrítico. Por este motivo, en el siguiente ensayo se decidió aumentar la rugosidad de la base del canal de disipación.

6.4.3. Flujo en canal con base de rugosidad alta

En la siguiente tabla se presentan las mediciones experimentales realizadas para este ensayo, el cual es descrito en el punto 5.4.

TABLA N° 10: Mediciones experimentales de tirantes en el canal de rugosidad alta

Distancia de medición (cm)	Tirante (cm)
25	1.63
50	1.09
75	2.81
100	2.00
150	2.14

Del mismo modo que en el procedimiento anterior, se consideró el tirante medido a 150 cm del inicio del canal de disipación debido a que en este punto se observa un flujo desarrollado. Como se realizó en el punto anterior, a continuación se muestra los cálculos realizados para obtener el número de Froude para este ensayo.

- Velocidad del flujo en el canal:

$$0.005 \text{ m}^3/\text{s} = V_m \times (0.19 \text{ m} \times 0.0214 \text{ m})$$

$$V_m = 1.229 \text{ m/s}$$

- Profundidad hidráulica:

$$D_h = 0.0214 \text{ m}$$

Finalmente, reemplazando los valores obtenidos en la ecuación de número de Froude, se tiene:

$$Fr_m = \frac{1.229 \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.0214 \text{ m}}}$$

$$Fr_m = 2.68$$

En este ensayo también se puede observar que el valor del número de Froude es mayor que la unidad, lo cual indica que el flujo aún se encuentra en régimen supercrítico. Por este motivo, para cumplir el objetivo de esta tesis, en el siguiente ensayo se decidió utilizar una barrera a manera de dissipador de energía.

6.5. Ensayos realizados haciendo uso de barreras como dissipadores de energía

A continuación se presenta los resultados experimentales del grupo de ensayos realizados considerando el uso de barreras como dissipadores de energía en el canal de disipación, con la finalidad de lograr con estas un régimen de flujo subcrítico.

Cabe mencionar que los dissipadores de energía utilizados han sido ensayados sobre la base de rugosidad media y rugosidad alta en el canal de disipación.

En los ensayos realizados se pueden distinguir: un flujo sobre la barrera hidráulico, zona de turbulencia y zona de flujo estable, las cuales componen el perfil generado debido a la barrera colocada y que han sido medidas en los ensayos realizados. A continuación se procede a describir las partes del perfil mencionadas:

a) *Flujo sobre la barrera:*

El flujo sobre la barrera se refiere al perfil generado luego de que el flujo de agua ha impactado con la barrera. Como se puede apreciar en la Figura N° 19, el flujo choca con la barrera generando una elevación “h” del flujo sobre esta, el cual luego presenta una longitud de caída libre “L₁”. Ambas distancias son medidas a partir del punto medio de la barrera.

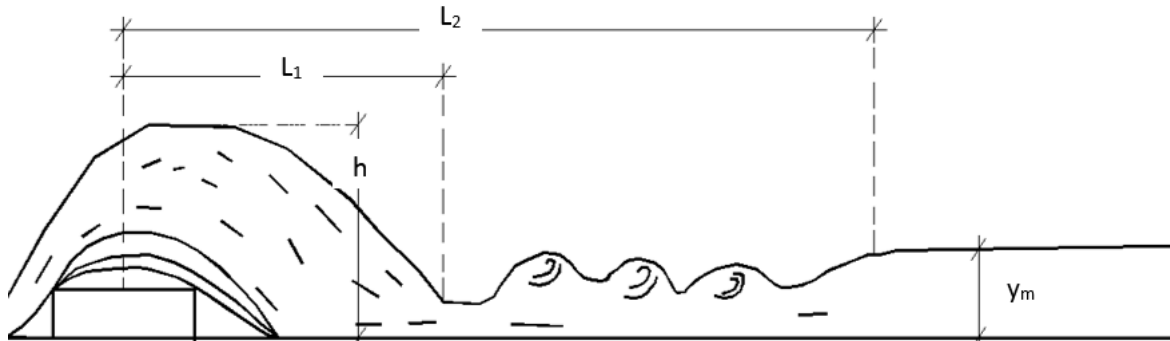
b) *Zona de turbulencia “L₂”:*

Llamaremos Zona de Turbulencia a la longitud del perfil que muestre un flujo turbulento u ondas que no permitan una correcta medición del tirante. Esta longitud “L₂”, está comprendida entre el punto medio de la barrera, hasta donde se pudo observar que el flujo se volvía desarrollado.

c) *Zona de flujo desarrollado:*

Llamaremos Zona de flujo desarrollado, a aquel tramo del perfil que se presenta luego de la zona de turbulencia donde el flujo ya no presenta mayores ondulaciones lo cual permitía la medición del tirante de forma confiable.

FIGURA N° 21: Perfil generado por impacto de flujo en la barrera



6.5.1. Barrera simple en canal de disipación con base de rugosidad media

El procedimiento de este ensayo se encuentra descrito en el punto 5.5. A continuación, se muestra las mediciones realizadas durante el mismo y presentadas de acuerdo a las partes que conforman el perfil generado, definidas al inicio de esta sección. Los resultados obtenidos serán discutidos dentro de las conclusiones de este documento

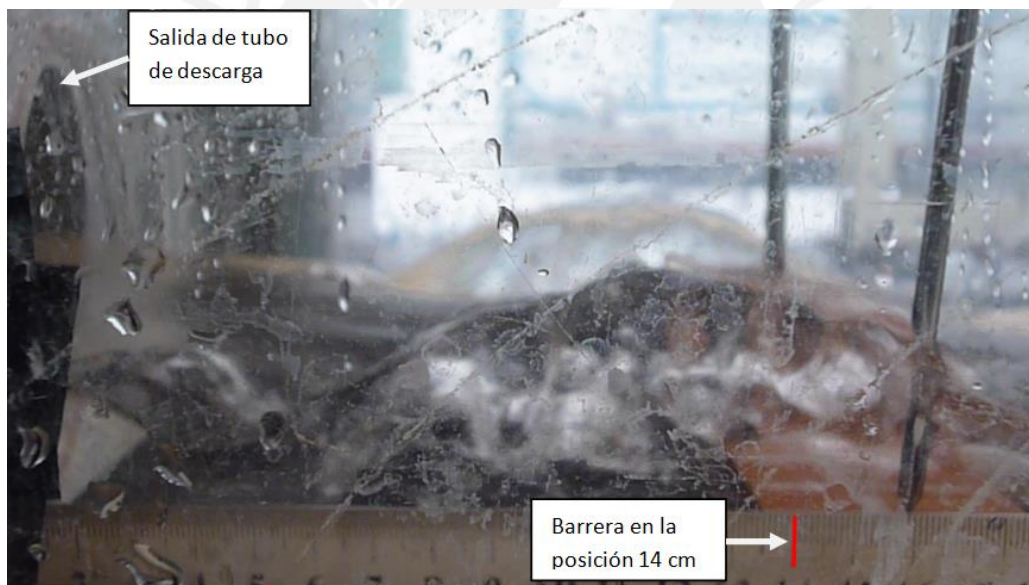
a) Flujo sobre la barrera:

La siguiente tabla muestra los valores de longitud de caída libre " L_1 ", medidos durante el ensayo, considerando diferentes ubicaciones de la barrera:

TABLA N° 11: Longitudes de caída libre “L₁” medidos experimentalmente

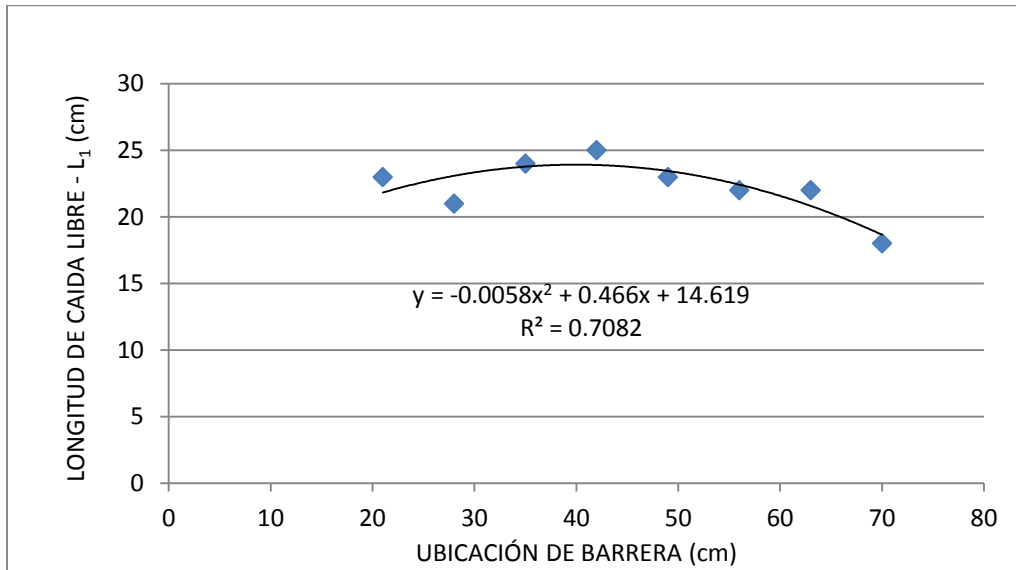
Ubicación de barrera (cm)	Longitud de caída libre - L ₁ (cm)
21	23
28	21
35	24
42	25
49	23
56	22
63	22
70	18

FIGURA N° 22: Perfil de flujo con barrera simple a 14 cm del punto de descarga



Como se puede observar en los videos contenidos en el CD adjunto y en la Figura 22, la barrera ubicada en la posición 7 y 14 cm no genera este fenómeno, por lo que para el ajuste de la curva se omitieron las mediciones realizadas en estas posiciones. A continuación se muestra el Gráfico N°1, Longitud de caída libre – L₁ (cm) versus Ubicación de barrera (cm), obtenido con los datos tabulados de la Tabla N°11.

GRÁFICO N° 1: Longitud de caída de caída libre – L_1 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



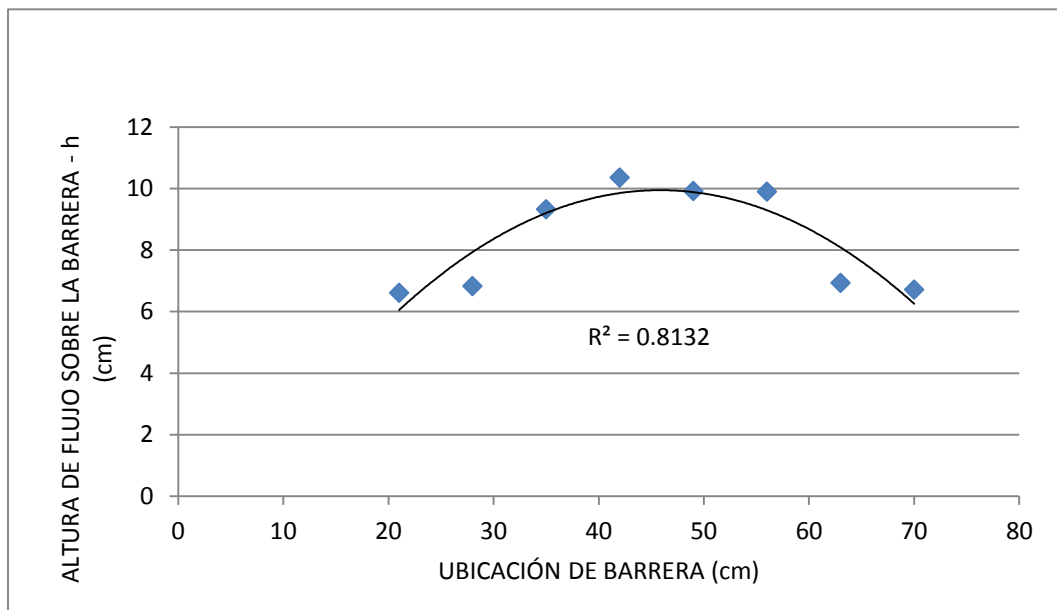
Es importante mencionar que, como se puede observar en este gráfico, la mayor longitud de caída libre " L_1 ", se presenta cuando ubicamos la barrera en la posición 42 cm.

La siguiente tabla muestra de forma tabulada la altura " h " a la cual llegó el flujo sobre la barrera para cada posición de esta.

TABLA N° 12: Alturas de flujo sobre la barrera medidos experimentalmente

	Ubicación de barrera (cm)							
	21	28	35	42	49	56	63	70
Altura de flujo sobre la barrera - h (cm)	6.61	6.83	9.32	10.35	9.92	9.9	6.93	6.71

A continuación se presenta el Gráfico N°2, Altura de flujo sobre la barrera – h (cm) versus Ubicación de barrera (cm), el cual muestra gráficamente los datos tabulados en la Tabla N°12:

GRÁFICO N° 2: Altura de flujo sobre la barrera – h (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)

En este gráfico se puede observar que la mayor altura de flujo sobre la barrera se presenta cuando ubicamos la barrera en la posición 42 cm.

b) Zona de turbulencia:

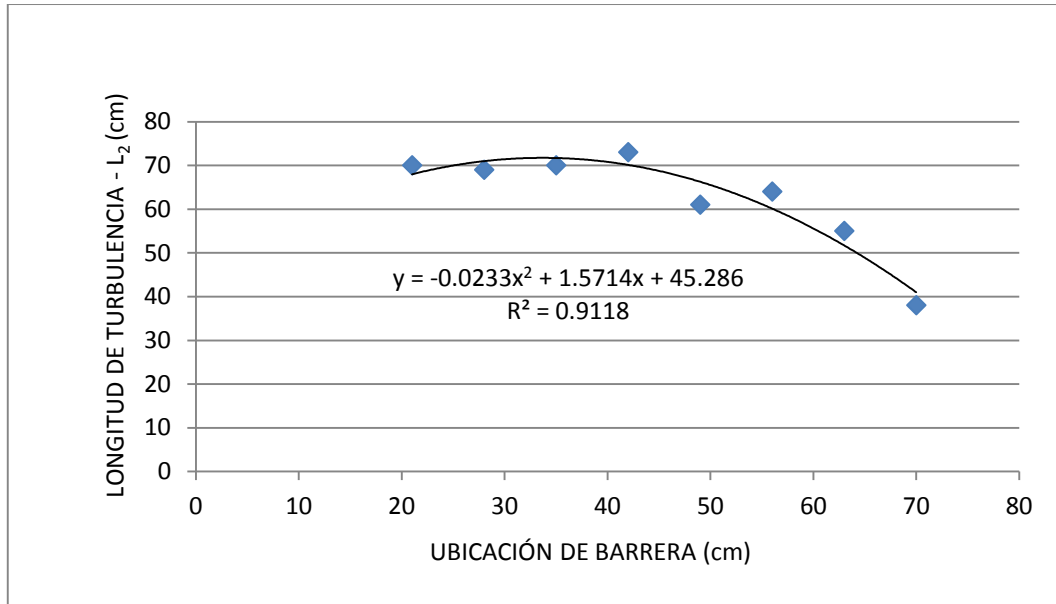
En la siguiente tabla se muestran las longitudes de la zona de turbulencia " L_2 " medidas durante el ensayo.

TABLA N° 13: Longitud de turbulencia medida experimentalmente

Ubicación de barrera (cm)	Longitud de turbulencia – L_2 (cm)
21	70
28	69
35	70
42	73
49	61
56	64
63	55
70	38

A continuación se presenta el Gráfico N°3, Longitud de turbulencia – L_2 (cm) versus Ubicación de barrera (cm), obtenido con los datos tabulados de la Tabla N°13. Las mediciones tomadas en posiciones 7 y 14 cm se omitieron debido a que no presentan el perfil descrito al inicio de la sección y para un mejor ajuste de la línea de tendencia.

GRÁFICO N° 3: Longitud de turbulencia – L_2 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



Como se puede observar en la Tabla N°13 y en el Gráfico N°3, la ubicación de la barrera en las posiciones 21, 28 y 35 cm presentan valores similares, presentándose el valor máximo en la posición 42 cm, coincidiendo este con la posición del mayor valor medido de longitud de caída libre hidráulico.

c) Zona de flujo desarrollado:

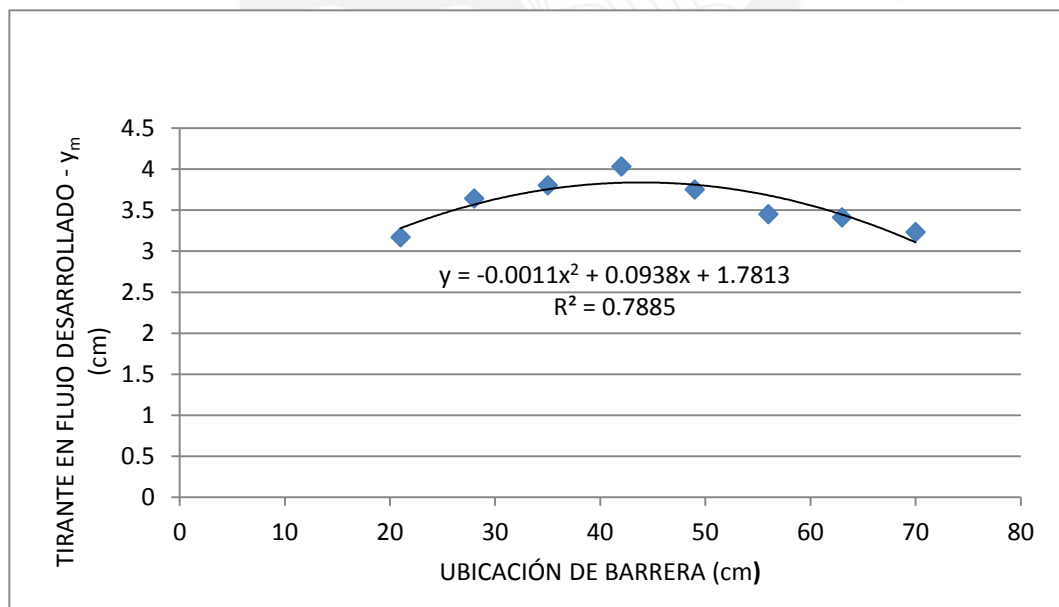
En la siguiente tabla se muestran los tirantes medidos durante este ensayo.

TABLA N° 14: Tirantes “ y_m ” medidos experimentalmente usando la barrera simple sobre el canal con base de rugosidad media

Posición de medición de tirante (cm)	Ubicación de barrera (cm)							
	21	28	35	42	49	56	63	70
25	-	-	-	-	-	-	-	-
50	2.72	2.84	-	-	-	-	-	-
75	1.84	2.87	3.01	0.95	1.95	-	-	-
100	2.21	2.64	2.6	2.68	3.91	3.99	3.08	2.53
150	3.17	3.64	3.80	4.03	3.75	3.45	3.41	3.23

A continuación se presenta el Gráfico N°4, Tirante de flujo desarrollado – y_m (cm) versus Ubicación de barrera (cm), para el cual se consideran los valores de tirantes medidos a los 150 cm del punto de descarga ya que en este punto se observa un flujo desarrollado. Cabe mencionar que se omitieron los valores medidos para las posiciones 7 y 14 cm debido a que en los puntos anteriores tampoco fueron considerados.

GRÁFICO N° 4: Tirante en flujo desarrollado - y_m (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



En este gráfico se puede observar que el mayor valor de tirante se obtiene cuando la barrera se ubica en la posición 42 cm.

A continuación, con el mayor valor del tirante medido, se procede a calcular la velocidad del flujo " V_{2m} ":

$$0.005 \text{ m}^3/\text{s} = V_{2m} \times (0.19\text{m} \times 0.0403\text{m})$$

$$V_{2m} = 0.653 \text{ m/s}$$

Con el valor obtenido de velocidad, se procede a calcular el número de Froude para evaluar en que régimen se encuentra el flujo de agua:

$$Fr_m = \frac{0.653}{\sqrt{9.81 \times 0.0403}}$$

$$Fr_m = 1.03$$

Como se puede observar, el número de Froude es mayor a la unidad, por lo que el régimen del flujo es supercrítico.

Por otro lado, para evaluar la eficiencia de la barrera se calcula la pérdida de energía, considerando para la energía inicial " E_{1m} " el tirante medido en la posición 25 cm del ensayo "Descarga de flujo en canal con base de rugosidad media" mostrado en la Tabla N°9. A continuación se muestra el cálculo de la velocidad para este tirante:

$$0.005 \text{ m}^3/\text{s} = V_{1m} \times (0.19\text{m} \times 0.0157\text{m})$$

$$V_{1m} = 1.67 \text{ m/s}$$

Para la energía " E_2 ", se utilizó el tirante medido a los 150 cm del punto de descarga, en la ubicación 42 cm de la barrera, posición para la cual ya se calculó la velocidad correspondiente para el cálculo del número de Froude.

Con los valores obtenidos procedemos a calcular la pérdida de energía " ΔE_m " según la siguiente ecuación:

$$\Delta E_m = E_{1m} - E_{2m}$$

$$\Delta E_m = \left(y_{1m} + \frac{V_{1m}^2}{2g} \right) - \left(y_{2m} + \frac{V_{2m}^2}{2g} \right)$$

Reemplazando los valores obtenidos en esta ecuación, se tiene:

$$\Delta E_m = \left(0.0157\text{m} + \frac{(1.67\text{m/s})^2}{2 \times 9.81\text{m/s}^2} \right) - \left(0.0403\text{m} + \frac{(0.653\text{m/s})^2}{2 \times 9.81\text{m/s}^2} \right)$$

$$\Delta E_m = (0.157) - (0.0620)$$

$$\Delta E_m = 0.095 \text{ m}$$

6.5.2. Barrera simple en canal de disipación con base de rugosidad alta

El procedimiento de este ensayo se encuentra descrito en el punto 5.6. A continuación, se muestra las mediciones realizadas durante este ensayo, presentadas de acuerdo a las partes que conforman el perfil generado, definidas al inicio de esta sección.

a) Flujo sobre la barrera:

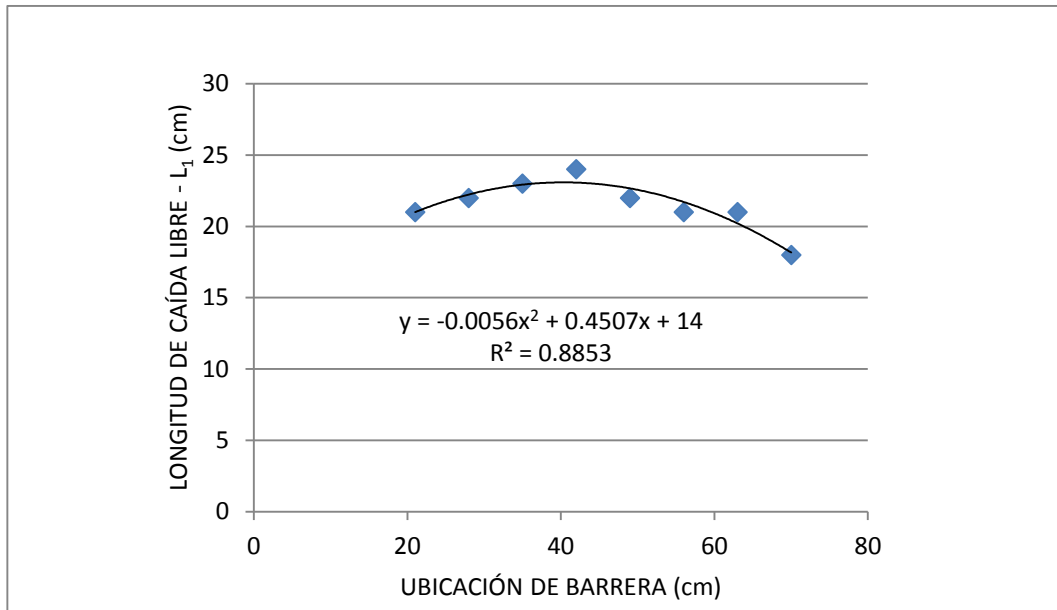
La siguiente tabla muestra los valores de longitud de caída libre “L₁” medidos durante este ensayo, considerando diferentes ubicaciones de la barrera con respecto al punto de descarga:

TABLA N° 15: Longitudes de caída libre “L₁” medidos experimentalmente

Ubicación de barrera (cm)	Longitud de caída libre - L ₁ (cm)
21	21
28	22
35	23
42	24
49	22
56	21
63	21
70	18

Del mismo modo como se realizó en el procesamiento de datos anterior, se han omitido los valores obtenidos para la barrera ubicada en la posición 7 y 14 cm, ya que no presentan este fenómeno. A continuación se muestra el Gráfico N°5, Longitud de caída libre – L₁ (cm) versus Ubicación de barrera (cm), obtenido con los datos tabulados de la Tabla N°15.

GRÁFICO N° 5: Longitud de caída de caída libre – L_1 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



En este gráfico se puede observar que la mayor longitud de caída libre se presenta cuando la barrera se ubica en la posición 42 cm.

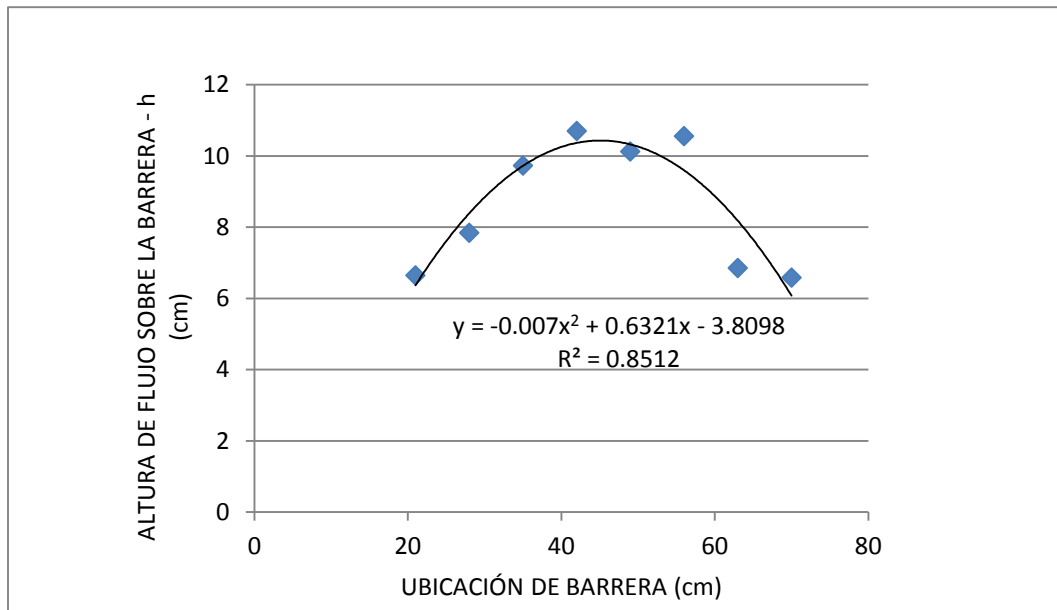
Por otro lado, En la siguiente tabla se muestra de forma tabulada la “h” a la cual llegó el flujo sobre la barrera para cada posición de esta.

TABLA N° 16: Alturas de flujo sobre la barrera medidos experimentalmente

	Ubicación de barrera (cm)							
	21	28	35	42	49	56	63	70
Altura de flujo sobre la barrera - h (cm)	6.65	7.84	9.73	10.7	10.13	10.56	6.85	6.58

A continuación se muestra gráficamente los datos tabulados en la Tabla N°16.

GRÁFICO N° 6: Altura de flujo sobre la barrera – h (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



En este gráfico se puede observar que el mayor valor de “h” se presenta cuando ubicamos la barrera en la posición 42 cm. Por otro lado, se puede observar que las mediciones realizadas en las posiciones 42, 49 y 56 cm presentan valores similares.

b) Zona de turbulencia:

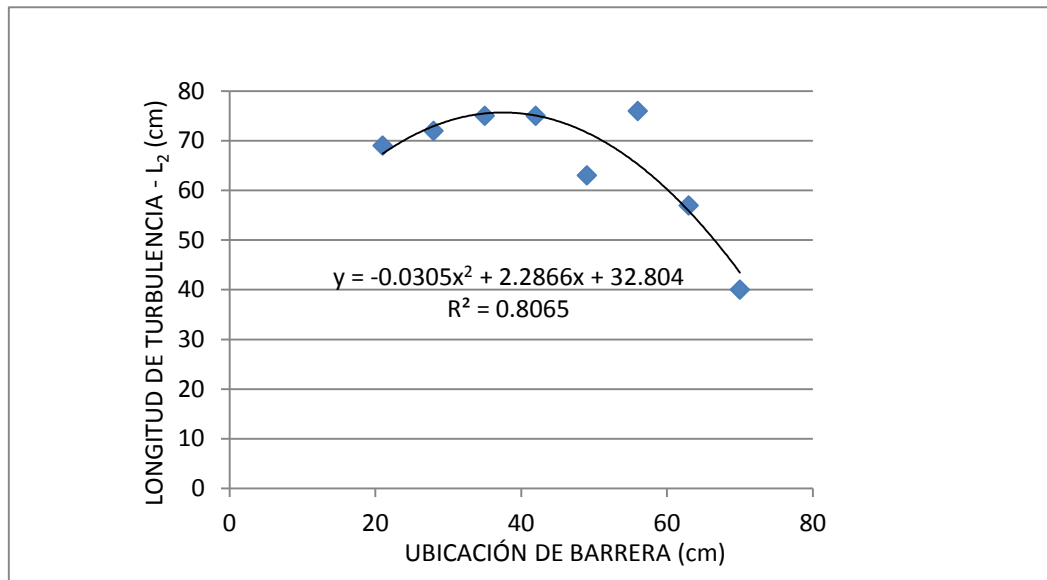
En la siguiente tabla se muestran las longitudes de la zona de turbulencia “ L_2 ” medidas durante este ensayo.

TABLA N° 17: Longitud de turbulencia medida experimentalmente

Ubicación de barrera (cm)	Longitud de turbulencia – L_2 (cm)
21	69
28	72
35	75
42	75
49	63
56	76
63	57
70	40

A continuación se presenta gráficamente los datos tabulados de la Tabla N°17. Cabe mencionar que las mediciones tomadas en posiciones 7 y 14 cm se omitieron debido a que no presentan el perfil descrito en la parte inicial de esta sección y para un mejor ajuste de la línea de tendencia.

GRÁFICO N° 7: Longitud de turbulencia – L_2 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



Como se puede observar en la Tabla N°17 y en el Gráfico N°7, los valores obtenidos cuando la barrera está ubicada en la posición 35 y 42 cm son similares, siendo este el mayor valor medido. Se puede observar que la medición realizada en la posición 56 cm presenta un mayor valor, pero en el gráfico se observa que este valor no va acorde a la línea de tendencia de los demás valores medidos debido a algún error de medición durante el ensayo, por lo cual no será considerado.

c) Zona de flujo desarrollado:

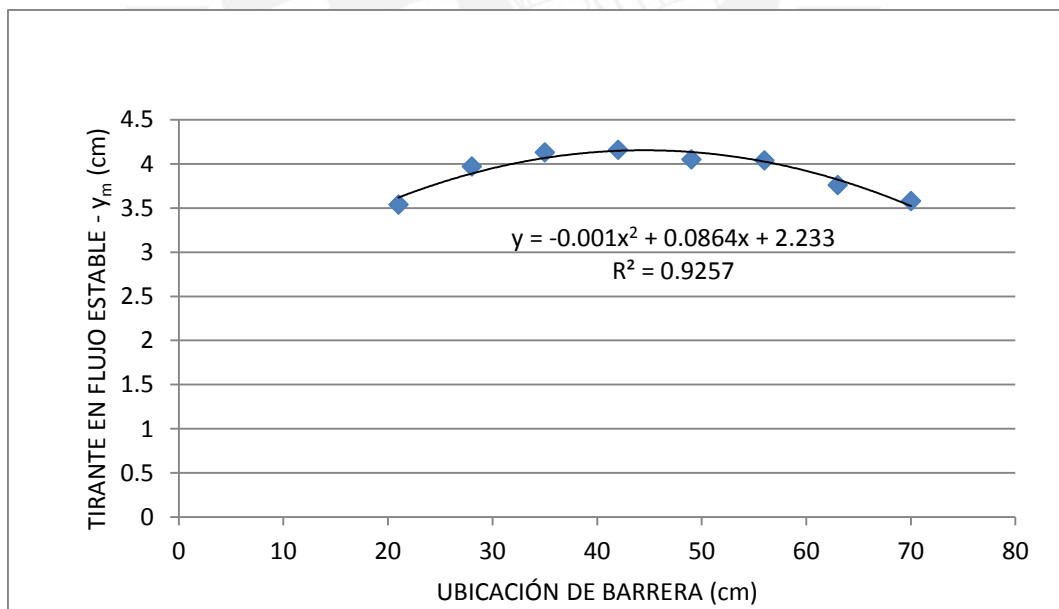
En la siguiente tabla se muestran los tirantes medidos durante este ensayo.

TABLA N° 18: Tirantes “ y_m ” medidos experimentalmente usando la barrera simple sobre el canal con base de rugosidad alta

Posición de medición de tirante (cm)	Ubicación de barrera (cm)							
	21	28	35	42	49	56	63	70
25	-	-	-	-	-	-	-	-
50	2.93	2.95	-	-	-	-	-	-
75	2.64	2.99	2.41	1.31	1.85	3.55	-	-
100	2.36	3.54	2.77	2.72	4.44	3.26	3.09	2.72
150	3.54	3.97	4.13	4.16	4.05	4.04	3.76	3.58

A continuación se presenta gráficamente los valores de tirantes medidos a los 150 cm del punto de descarga. Cabe mencionar que se omitieron los valores medidos para las posiciones 7 y 14 cm debido a que en los puntos anteriores tampoco fueron considerados.

GRÁFICO N° 8: Tirante en flujo desarrollado - y_m (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



Como se puede observar en este gráfico, el tirante generado ubicando la barrera en la posición 42 cm es el valor más alto del grupo de valores medidos durante el ensayo.

A continuación, haciendo uso del mayor valor de tirante medido, se procede a calcular la velocidad en el flujo estable " V_{2m} ".

$$0.005 \text{ m}^3/\text{s} = V_{2m} \times (0.19\text{m} \times 0.0416\text{m})$$

$$V_{2m} = 0.633 \text{ m/s}$$

Con el valor obtenido de velocidad, se procede a calcular el número de Froude para evaluar en que régimen se encuentra el flujo de agua:

$$Fr_m = \frac{0.633\text{m/s}}{\sqrt{9.81\text{m/s}^2 \times 0.0416\text{m}}}$$

$$Fr_m = 0.99$$

Como se puede observar, el valor obtenido se encuentra cercano a la unidad, por lo que podríamos decir que el flujo se encuentra en un régimen crítico. Por este motivo, se decidió probar con una configuración distinta de barrera en el siguiente ensayo.

Por otro lado, para evaluar la eficiencia de la barrera se calcula la pérdida de energía, considerando para la energía inicial " E_{1m} " el tirante medido en la posición 25 cm del ensayo "Descarga de flujo en canal con base de rugosidad alta" presentado en la Tabla N°10. A continuación se muestra el cálculo de la velocidad para este tirante:

$$0.005 \text{ m}^3/\text{s} = V_{1m} \times (0.19\text{m} \times 0.0163\text{m})$$

$$V_{1m} = 1.61 \text{ m/s}$$

Para la energía " E_{2m} " se utilizó el tirante medido a los 150 cm del punto de descarga, en la ubicación 42 cm de la barrera, posición para la cual ya se calculó la velocidad correspondiente para el cálculo del número de Froude.

Con los valores obtenidos procedemos a calcular la pérdida de energía " ΔE_m " según la siguiente ecuación:

$$\Delta E_m = E_{1m} - E_{2m}$$

$$\Delta E_m = \left(y_{1m} + \frac{V_{1m}^2}{2g} \right) - \left(y_{2m} + \frac{V_{2m}^2}{2g} \right)$$

Reemplazando los valores obtenidos en esta ecuación, se tiene:

$$\Delta E_m = \left(0.0163m + \frac{(1.61m/s)^2}{2 \times 9.81m/s^2} \right) - \left(0.0416m + \frac{(0.633m/s)^2}{2 \times 9.81m/s^2} \right)$$

$$\Delta E_m = (0.148) - (0.0620)$$

$$\Delta E_m = 0.086 m$$

6.5.3. Barrera dentada en el canal de disipación con base de rugosidad alta

El procedimiento de este ensayo se encuentra descrito en el punto 5.7. Como se menciona en este, las mediciones para este ensayo se realizaron en las posiciones 14, 28, 42, 49 y 70 cm. debido a que en los ensayos anteriores para la posición 7 cm no se observó mayor influencia de la barrera en el tirante de flujo estable, por lo cual se omitió la medición en esta posición. A continuación se muestran las mediciones realizadas durante este ensayo, presentadas de acuerdo a las partes que conforman el perfil generado, definidas al inicio de esta sección.

a) Flujo sobre la barrera:

A continuación se presenta la Tabla N°19, la cual muestra los valores de longitud de caída libre "L₁" medidos durante este ensayo, considerando diferentes ubicaciones de la barrera con respecto al punto de descarga:

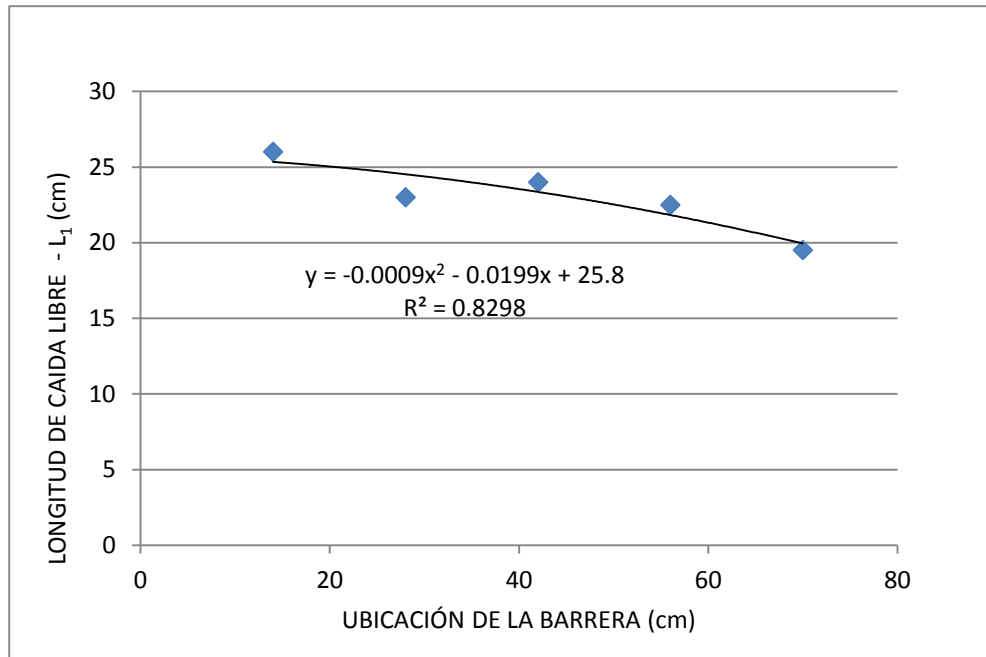
TABLA N° 19: Longitudes de caída libre "L₁" medidos experimentalmente

Ubicación de barrera (cm)	Longitud de caída libre - L ₁ (cm)
14	26
28	23
42	24
56	23
70	20

A diferencia de los ensayos anteriores, en la posición 14 cm se puede observar que se genera un flujo sobre la barrera y turbulencia (definidos anteriormente); además,

también se puede observar que la longitud de caída libre es mayor en esta posición que en otras ubicaciones de la barrera. A continuación se muestra el Gráfico N°9, Longitud de caída libre – L_1 (cm) versus Posición de barrera (cm), obtenido con los datos tabulados de la Tabla N°19.

GRÁFICO N° 9: Longitud de caída de caída libre – L_1 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



En este gráfico se puede observar que la mayor longitud de caída libre se presenta cuando ubicamos la barrera en la posición 14 cm.

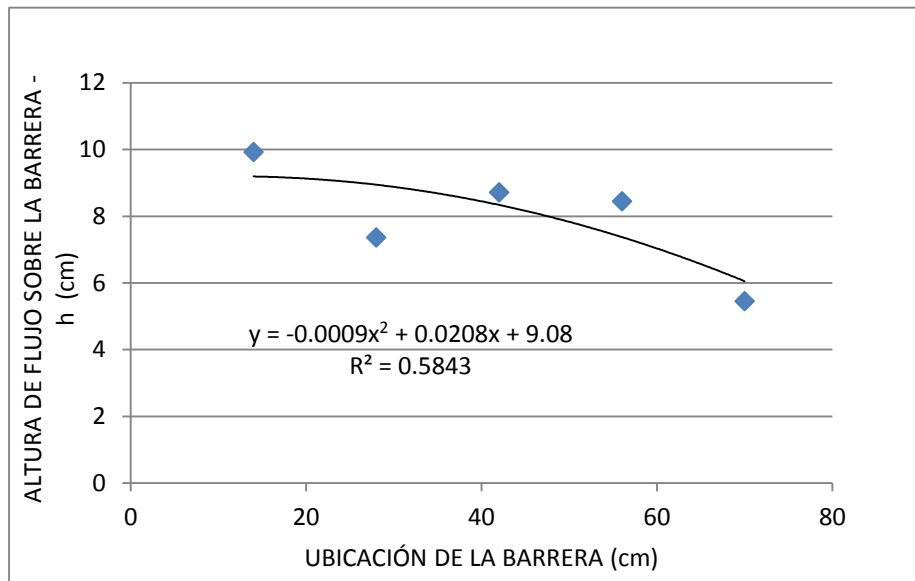
En la siguiente tabla se muestra de forma tabulada la altura “h” a la cual llegó el flujo sobre la barrera para cada posición de esta.

TABLA N° 20: Alturas de flujo sobre la barrera medidos experimentalmente

	Ubicación de barrera (cm)				
	14	28	42	56	70
Altura de flujo sobre la barrera - h (cm)	9.92	7.36	8.72	8.45	5.45

A continuación se muestra gráficamente los datos tabulados en la Tabla N°20:

GRÁFICO N° 10: Altura de flujo sobre la barrera – h (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



En este gráfico se puede observar que la mayor altura de flujo sobre la barrera se presenta cuando ubicamos esta en la posición 14 cm. Por otro lado, se puede observar que las mediciones realizadas en las posiciones 42 y 56 cm presentan valores similares.

b) Zona de turbulencia:

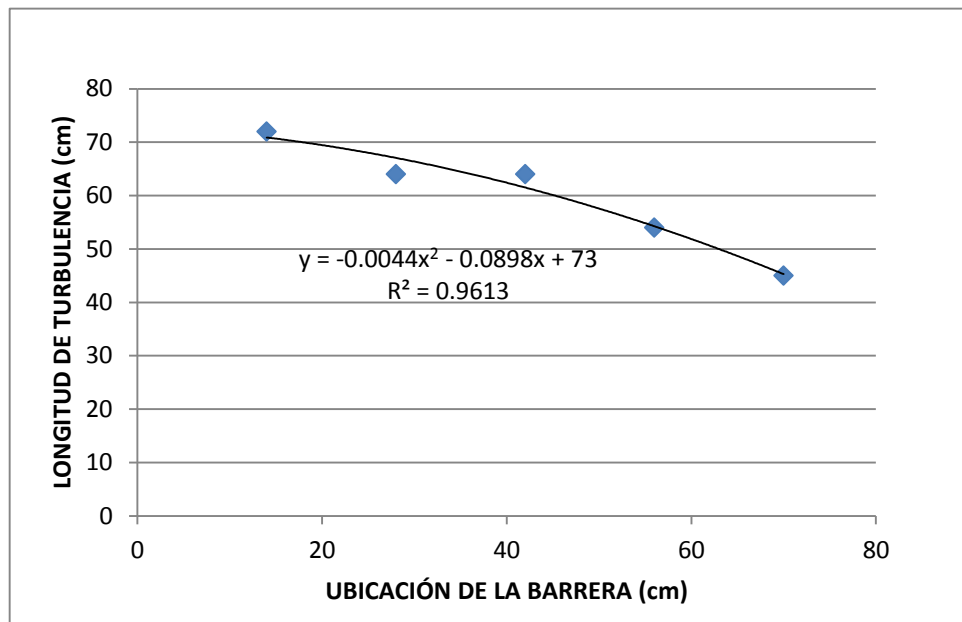
En la siguiente tabla se muestran las longitudes de la zona de turbulencia “ L_2 ” medidas durante el ensayo.

TABLA N° 21: Longitud de turbulencia medida experimentalmente

Ubicación de barrera (cm)	Longitud de turbulencia – L_2 (cm)
14	72
28	64
42	64
56	54
70	45

A continuación se presenta gráficamente los datos tabulados de la Tabla N°21.

GRÁFICO N° 11: Longitud de turbulencia – L_2 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



En este gráfico se puede observar que para la posición 14 cm se obtiene un valor de Longitud de turbulencia mayor que en las demás ubicaciones de la barrera. Cabe mencionar que el valor que sigue a este es el medido ubicando la barrera en la posición 28 cm, similar al valor obtenido en la posición 42 cm.

c) Zona de flujo desarrollado:

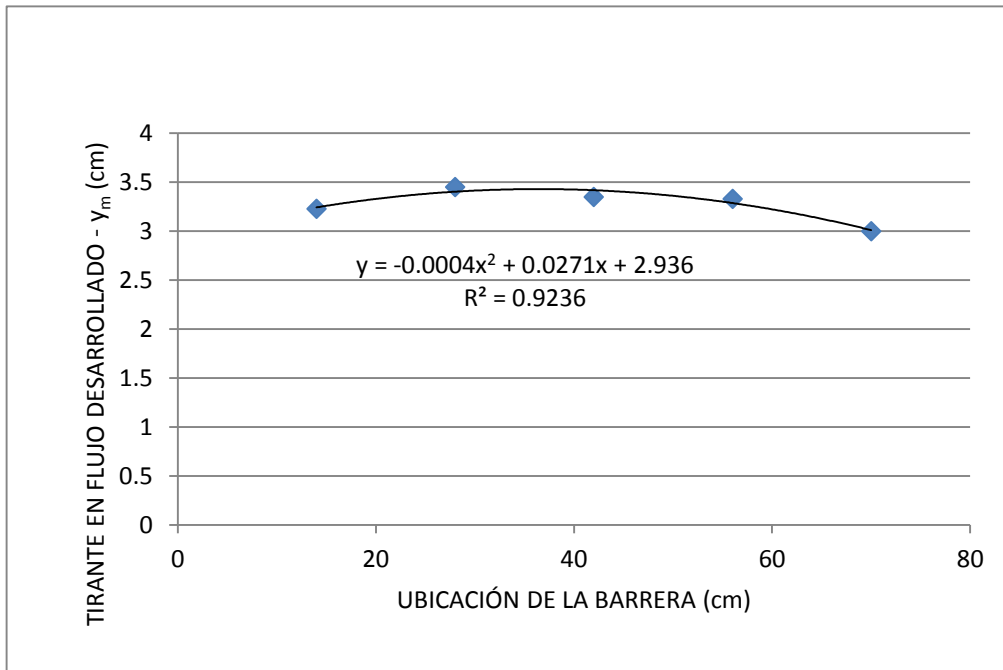
En la siguiente tabla se muestran los tirantes medidos durante este ensayo.

TABLA N° 22: Tirantes “ y_m ” medidos experimentalmente usando la barrera dentada sobre el canal con base de rugosidad alta

Posición de medición de tirante (cm)	Ubicación de barrera (cm)				
	14	28	42	56	70
25	-	-	-	-	-
50	2.9	2.04	-	-	-
75	2.17	2.14	2.45	-	-
100	2.57	2.83	3	3.09	2.3
150	3.23	3.45	3.35	3.33	3

A continuación se presenta el Gráfico N°12, Tirante de flujo desarrollado - y_m (cm) versus Ubicación de barrera (cm), para el cual se consideraron los valores de tirantes medidos a los 150 cm del punto de descarga porque en esta ubicación se observa un flujo desarrollado.

GRÁFICO N° 12: Tirante en flujo desarrollado - y_m (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



Como se puede observar en este gráfico, el tirante generado ubicando la barrera en la posición 28 cm es el valor más alto del grupo de valores medidos durante el ensayo.

A continuación, haciendo uso del mayor valor de tirante medido, se procederá a calcular la velocidad en el flujo desarrollado, para luego calcular la energía perdida debido al impacto del flujo contra fondo del canal luego de la caída libre de este.

$$0.005 \text{ m}^3/\text{s} = V_{2m} \times (0.19\text{m} \times 0.0345\text{m})$$

$$V_{2m} = 0.763 \text{ m/s}$$

Con el valor obtenido de velocidad, se procede a calcular el número de Froude para evaluar en que régimen se encuentra el flujo de agua:

$$Fr_m = \frac{0.763\text{m/s}}{\sqrt{9.81\text{m/s}^2 \times 0.0345\text{m}}}$$

$$Fr_m = 1.31$$

Como se puede observar, el valor obtenido es superior a la unidad, lo cual indica que el flujo de agua se encuentra en un régimen supercrítico. Por este motivo, se decidió utilizar una configuración distinta de barrera en el siguiente ensayo.

Por otro lado, para evaluar la eficiencia de la barrera se calcula la pérdida de energía, considerando para la energía inicial " E_{1m} " el tirante medido en la posición 25 cm del ensayo "Descarga de flujo en canal con base de rugosidad alta", mostrado en la Tabla N° 10 para lo cual se usará la velocidad ya calculada anteriormente para este tirante.

$$V_{1m} = 1.61 \text{ m/s}$$

Para la energía " E_{2m} " se utilizó el tirante medido a los 150 cm del punto de descarga en la ubicación 28 cm de la barrera, posición para la cual ya se calculó la velocidad correspondiente para el cálculo del número de Froude.

Con los valores obtenidos procedemos a calcular la pérdida de energía " ΔE_m " según la siguiente ecuación:

$$\Delta E_m = E_{1m} - E_{2m}$$

$$\Delta E_m = \left(y_{1m} + \frac{V_{1m}^2}{2g} \right) - \left(y_{2m} + \frac{V_{2m}^2}{2g} \right)$$

Reemplazando los valores obtenidos en esta ecuación, se tiene:

$$\Delta E_m = \left(0.0163\text{m} + \frac{(1.61\text{m/s})^2}{2 \times 9.81\text{m/s}^2} \right) - \left(0.0345\text{m} + \frac{(0.763\text{m/s})^2}{2 \times 9.81\text{m/s}^2} \right)$$

$$\Delta E_m = (0.148) - (0.0642)$$

$$\Delta E_m = 0.084 \text{ m}$$

6.5.4. Barrera empedrada en el canal de Disipación con base de rugosidad alta

El procedimiento de este ensayo se encuentra descrito en el punto 5.8. Como se menciona en este, las mediciones para este ensayo se realizaron para las posiciones 28, 42, 49 y 70 cm. debido a que en posiciones menores a las mencionadas no se observó mayor influencia de la barrera en el tirante de flujo estable, por lo cual se omitieron estas mediciones. A continuación se muestra las mediciones realizadas

durante este ensayo, presentadas de acuerdo a las partes que conforman el perfil generado, definidas al inicio de esta sección.

a) Flujo sobre barrera:

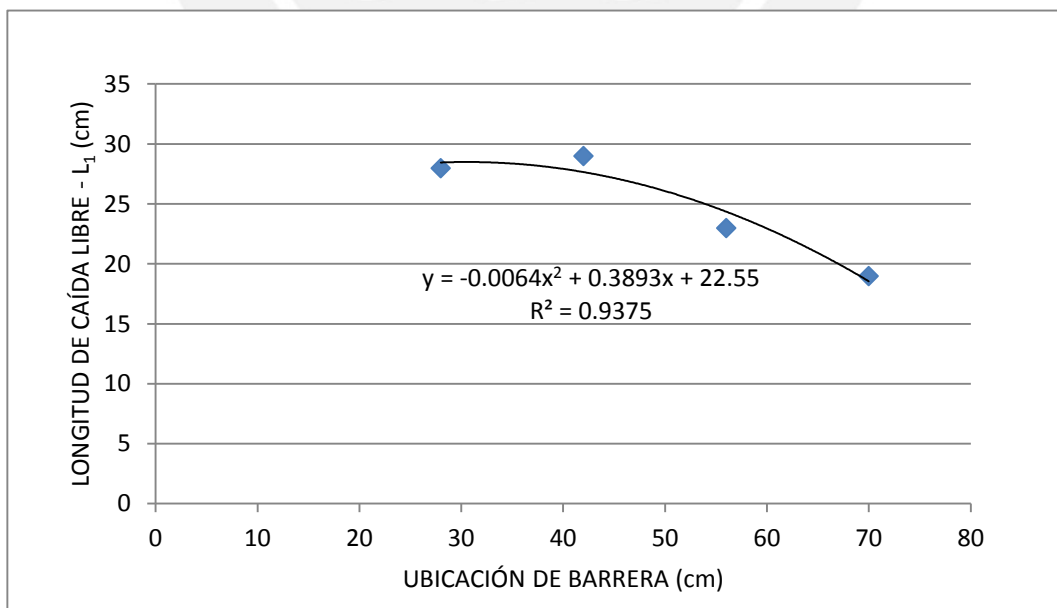
En la siguiente tabla se muestra los valores de longitud de caída libre “L₁” medidos durante este ensayo, considerando diferentes ubicaciones de la barrera con respecto al punto de descarga:

TABLA N° 23: Longitudes de caída libre “L₁” medidos experimentalmente

Ubicación de barrera (cm)	Longitud de caída libre - L ₁ (cm)
28	28
42	29
56	23
70	19

A continuación se muestra el Gráfico N°13, Longitud de caída libre – L₁ (cm) versus Ubicación de barrera (cm), obtenido con los datos tabulados de la Tabla N°23.

GRÁFICO N° 13: Longitud de caída libre – L₁ (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



En este gráfico se puede observar que la mayor longitud de caída libre se presenta cuando se ubica la barrera en la posición 42 cm.

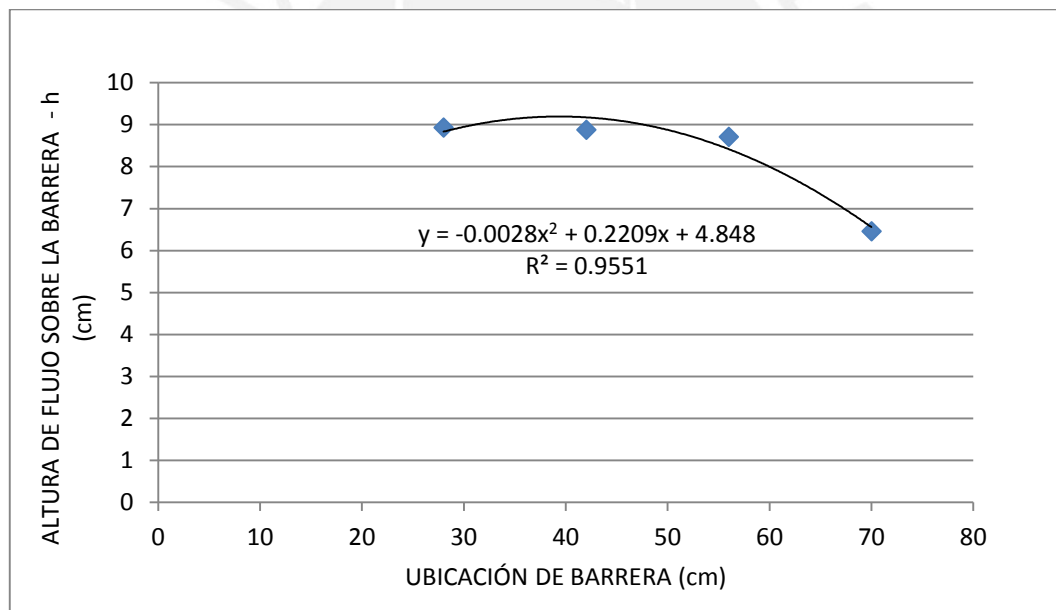
En la siguiente tabla se muestra de forma tabulada la altura “h” a la cual llegó el flujo sobre la barrera para cada posición de esta.

TABLA N° 24: Alturas de flujo sobre la barrera medidos experimentalmente

	Ubicación de barrera (cm)			
	28	42	56	70
Altura de flujo sobre la barrera - h (cm)	8.93	8.88	8.71	6.46

A continuación se presenta el Gráfico N°14, Altura de flujo sobre la barrera (cm) versus Ubicación de barrera (cm), obtenido con los datos tabulados en la Tabla N°24.

GRÁFICO N° 14: Altura de flujo sobre la barrera – h (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



En este gráfico se puede observar que la mayor altura de flujo sobre la barrera se presenta cuando esta se ubica en la posición 28 cm, la cual no presenta mayor variación con respecto a la medición tomada en la posición 42 cm.

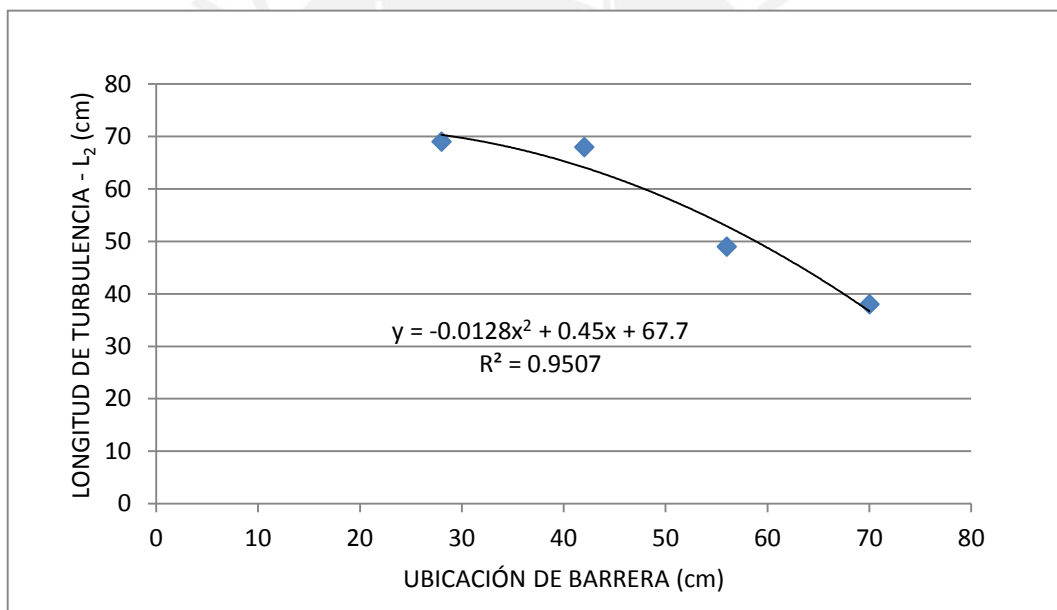
b) Zona de turbulencia:

En la siguiente tabla se muestran las longitudes de la zona de turbulencia “L₂” medidas durante el ensayo.

TABLA N° 25: Longitud de turbulencia medida experimentalmente

Ubicación de barrera (cm)	Longitud de turbulencia – L_2 (cm)
28	69
42	68
56	49
70	38

A continuación se presenta el Gráfico N°15, Longitud de turbulencia – L_2 (cm) versus Ubicación de barrera (cm), obtenido con los datos tabulados de la Tabla N°25

GRÁFICO N° 15: Longitud de turbulencia – L_2 (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)

Como se puede observar en la Tabla N°25 y en el Gráfico N°15, el mayor valor medido se obtiene cuando la barrera está ubicada en la posición 28 cm, cabe mencionar que no presenta mucha variación con el valor medido para la posición 42 cm.

c) Zona de flujo desarrollado:

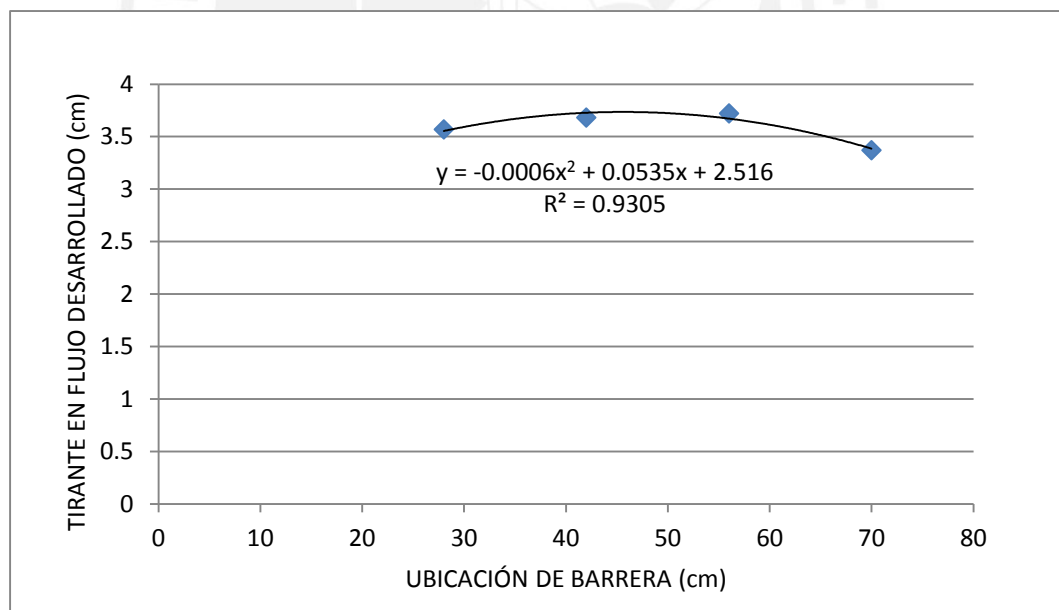
En la siguiente tabla se muestran los tirantes medidos durante este ensayo.

TABLA N° 26: Tirantes “ y_m ” medidos experimentalmente usando la barrera empedrada sobre el canal con base de rugosidad alta

Posición de medición de tirante (cm)	Ubicación de barrera (cm)			
	28	42	56	70
25	-	-	-	-
50	-	-	-	-
75	2.17	1.95	-	-
100	2.45	3.06	3.61	2.47
150	3.57	3.68	3.72	3.37

A continuación se presenta el Gráfico N°16, Tirante de flujo desarrollado – y_m (cm) versus Ubicación de barrera, para el cual se consideran los valores de tirantes medidos a los 150 cm del punto de descarga, porque en este punto se observa el flujo desarrollado.

GRÁFICO N° 16: Tirante en flujo desarrollado - y_m (cm) vs. Ubicación de barrera (cm)



Como se puede observar, el tirante generado ubicando la barrera en la posición 56 cm es el valor más alto del grupo de valores medidos durante el ensayo.

A continuación, haciendo uso del mayor valor de tirante medido, se procede a calcular la velocidad en el flujo estable, para luego calcular la energía perdida debido al impacto del flujo contra fondo del canal luego de la caída libre de este.

$$0.005 \text{ m}^3/\text{s} = V_{2m} \times (0.19\text{m} \times 0.0372\text{m})$$

$$V_{2m} = 0.707 \text{ m/s}$$

Con el valor obtenido de velocidad, se procede a calcular el número de Froude para evaluar en que régimen se encuentra el flujo de agua:

$$Fr_m = \frac{0.707\text{m/s}}{\sqrt{9.81\text{m/s}^2 \times 0.0372\text{m}}}$$

$$Fr_m = 1.17$$

Como se puede observar, este valor es superior a la unidad, lo cual indica que el flujo se encuentra en régimen supercrítico. Debido a esto, en el siguiente ensayo se optó por otro método para lograr el objetivo de esta tesis.

Por otro lado, para evaluar la eficiencia de la barrera se calcula la pérdida de energía, considerando para la energía inicial " E_{1m} " el tirante medido en la posición 25 cm del ensayo "Descarga de flujo en canal con base de rugosidad alta" mostrado en la Tabla N°10, para el cual se usó la velocidad calculada anteriormente para este tirante.

$$V_{1m} = 1.61 \text{ m/s}$$

Para la energía " E_{2m} " se utilizó el tirante medido en la a 150 cm del punto de descarga en la ubicación 56 cm de la barrera, posición para la cual ya se calculó la velocidad correspondiente para el cálculo del número de Froude.

Con los valores obtenidos procedemos a calcular la pérdida de energía " ΔE " según la siguiente ecuación:

$$\Delta E_m = E_{1m} - E_{2m}$$

$$\Delta E_m = \left(y_{1m} + \frac{V_{1m}^2}{2g} \right) - \left(y_{2m} + \frac{V_{2m}^2}{2g} \right)$$

Reemplazando los valores obtenidos en esta ecuación, se tiene:

$$\Delta E_m = \left(0.0163m + \frac{(1.61m/s)^2}{2 \times 9.81m/s^2} \right) - \left(0.0372m + \frac{(0.707m/s)^2}{2 \times 9.81m/s^2} \right)$$

$$\Delta E_m = (0.148) - (0.0627)$$

$$\Delta E_m = 0.085 \text{ m}$$

6.6. Ensayo realizado en canal de disipación con base empedrada

Como se puede observar en los resultados obtenidos anteriormente, no se pudo obtener un valor de número de Froude menor a la unidad; es decir, un régimen de flujo subcrítico, por lo cual se propuso la alternativa de colocar una base empedrada con la que pudiéramos lograr este tipo de régimen. El procedimiento de este ensayo se desarrolló en el punto 5.9.

A continuación se muestra la Tabla N°27 con los datos de las mediciones realizadas durante este ensayo.

TABLA N° 27: Tirantes medidos experimentalmente

Distancia de medición (cm)	Tirante (cm)
25	2.29
50	6.36
75	4.86
100	4.86
150	4.86

Del mismo modo como se realizó para los anteriores ensayos, el cálculo del número de Froude se calculó haciendo uso del tirante medido a los 150 cm del punto de descarga, para el cual se calculó la velocidad del flujo como se muestra a continuación.

$$0.005 \text{ m}^3/s = V_m \times (0.19m \times 0.0486m)$$

$$V_m = 0.543 \text{ m/s}$$

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación del número de Froude

$$Fr_m = \frac{0.543 \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.0486 \text{ m}}}$$

$$Fr_m = 0.79$$

Como se puede apreciar, el número de Froude obtenido es menor a la unidad, lo cual nos indica que el flujo se encuentra en régimen subcrítico. Para esto, como se puede apreciar en el video contenido en el CD anexo, el régimen subcrítico se pudo obtener luego de un resalto hidráulico, el cual se procederá a analizar para establecer la longitud necesaria para que este fenómeno suceda.

6.6.1. Análisis del resalto hidráulico

Un resalto hidráulico se define como el paso del flujo en régimen supercrítico a un régimen de flujo subcrítico, produciendo que parte de la energía cinética se convierta en energía potencial y que parte se disipe en forma de calor.

De acuerdo a lo observado durante el ensayo, en la Tabla N°28 se muestra los tirantes conjugados del resalto producido, así como la ubicación de estos respecto al punto de descarga del tubo.

Tabla N° 28: Tirantes conjugados medidos experimentalmente

Resalto hidráulico		
	Tirante (cm)	Distancia (cm)
Y₁ (Inicio)	2.29	24
Y₂ (Final)	6.36	53

a) Verificación de altura de tirante conjugado

A continuación se procede a verificar la altura del tirante conjugado “Y_{2m}” a partir del tirante medido en “Y_{1m}”, haciendo uso de la relación indicada en el libro “Hidráulica de canales abiertos” (Chow 1994: 386).

$$\frac{y_{2m}}{y_{1m}} = 0.5 \times \left(\sqrt{1 + 8 \times Fr_{1m}^2} - 1 \right)$$

Para hallar “Fr_{1m}” (número de Froude), se procede a calcular la velocidad del flujo haciendo uso del valor medido para “y₁” como se muestra a continuación:

$$0.005 \text{ m}^3/\text{s} = V_{1m} \times (0.19\text{m} \times 0.023\text{m})$$

$$V_{1m} = 1.149 \text{ m/s}$$

Con el valor de velocidad obtenido se calcula Fr_{1m} :

$$Fr_{1m} = \frac{1.149 \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.023 \text{ m}}}$$

$$Fr_{1m} = 2.42$$

Ven Te Chow (1994) indica que para el valor de Fr_{1m} obtenido, este se clasificaría como un resalto débil.

A continuación se reemplaza los valores obtenidos en la ecuación principal.

$$\frac{y_{2m}}{0.0229} = 0.5 \times (\sqrt{1 + 8 \times 2.42^2} - 1)$$

$$y_{2m} = 6.77 \text{ cm}$$

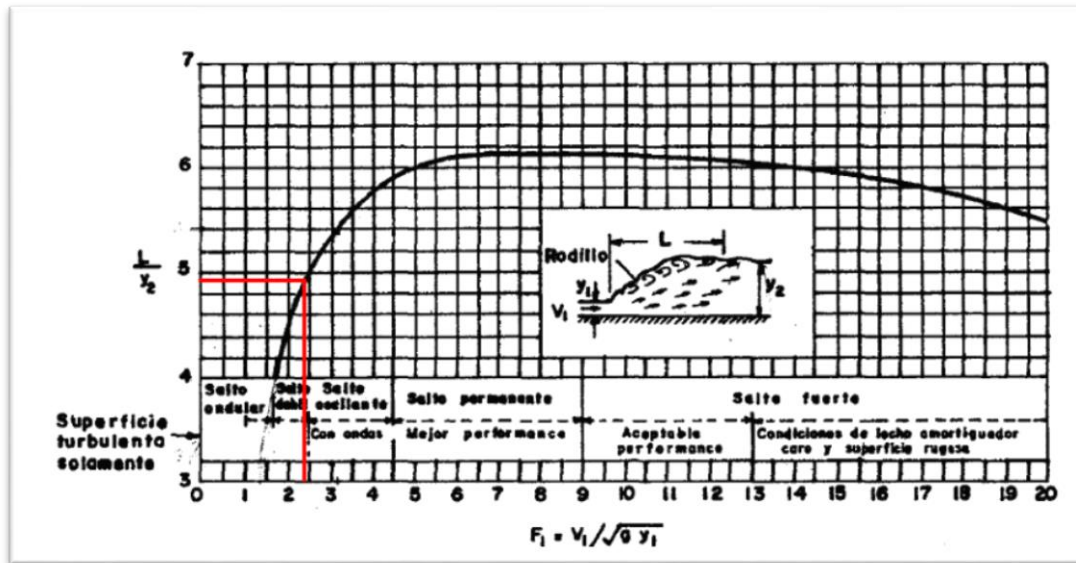
De acuerdo a los resultados obtenidos, el tirante obtenido experimentalmente presenta una variación de -0.41 cm (- 6.44 %) con respecto al tirante calculado.

b) Cálculo de longitud de resalto hidráulico

Como se puede apreciar en la Tabla N° 28, el resalto inicia a los 24 cm medidos a partir del punto de descarga del tubo y termina a los 53 cm, por lo cual la longitud experimental del resalto sería de 29 cm.

Para comparar el valor obtenido experimentalmente, a continuación se calculará la longitud del resalto hidráulico a partir del siguiente gráfico:

GRÁFICO N° 17: Cálculo de longitud de resalto



Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de Canales Abiertos*, Santa Fé de Bogotá. Pág. 390

A partir de este gráfico se calculará el valor de L_m como se muestra a continuación.

$$\frac{L_m}{y_{2m}} = 4.95$$

$$L_m = 4.95 \times 0.0567 \text{ m} = 0.2807 \text{ m}$$

Como se puede observar, la longitud obtenida experimentalmente presenta una variación de +0.93 cm (+3.21%) con respecto a la calculada. La similitud entre ambos valores se debe a que el Gráfico 17 fue elaborado en base a ensayos realizados en condiciones similares a las presentadas en este ensayo.

c) Cálculo de pérdida de energía debido al resalto hidráulico

A continuación se muestra el cálculo de pérdida de energía debido al resalto hidráulico.

$$\Delta E_m = E_{1m} - E_{2m}$$

$$\Delta E_m = \left(y_{1m} + \frac{V_{1m}^2}{2g} \right) - \left(y_{2m} + \frac{V_{2m}^2}{2g} \right)$$

Anteriormente se calculó la velocidad para el tirante y_{1m} , por lo cual a continuación se calculará la velocidad para el tirante y_{2m} :

$$0.005 \text{ m}^3/\text{s} = V_{2m} \times (0.19\text{m} \times 0.0636\text{m})$$

$$V_{2m} = 0.414 \text{ m/s}$$

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación principal:

$$\Delta E_m = \left(0.023\text{m} + \frac{(1.149\text{m/s})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \right) - \left(0.064 + \frac{(0.414\text{m/s})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \right)$$

$$\Delta E_m = (0.090) - (0.072)$$

$$\Delta E_m = 0.018 \text{ m}$$



CAPÍTULO VII

DIMENSIONAMIENTO A ESCALA REAL (PROTOTIPO)

En este capítulo se mostrará los cálculos realizados para dimensionar el modelo a escala real y poder reproducir el fenómeno descrito en el punto 6.5. Con esta finalidad procederemos a calcular la rugosidad absoluta en el modelo y como se debe reproducir esta en escala real (prototipo); además, también se estimará las dimensiones que deberá tener el canal de disipación de acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos mostrados anteriormente.

7.1. Cálculo de la rugosidad del modelo

Con esta finalidad, se partió de las expresiones deducidas para la velocidad media presentadas en el libro “Hidráulica de Tuberías y Canales” (Rocha 2007), el cual muestra dos expresiones para el cálculo de la velocidad media en conductos lisos, presentadas a continuación:

- Para canales

$$V = \frac{V^*}{k} \times \ln \frac{38.3R}{\delta}$$

- Para tuberías

$$V = \frac{V^*}{k} \times \ln \frac{46.4R}{\delta}$$

Se observa que ambas ecuaciones son muy parecidas, solo difieren en el valor numérico del coeficiente de $\frac{R}{\delta}$. Con el objeto de obtener una fórmula que comprenda tanto a tuberías como a canales, se tomó el promedio aproximado de los coeficientes (Rocha 2007: 76), obteniéndose la siguiente expresión:

$$V = \frac{V^*}{k} \times \ln \frac{42R}{\delta}$$

Donde:

V : Velocidad media

V^* : Velocidad de corte (\sqrt{gyS})

k : Constante de Karman (0.4 – sin sólidos en suspensión)

R : Radio hidráulico.

δ : Espesor de la subcapa laminar que se genera en el fondo del canal.

Por otro lado, a continuación se muestra dos ecuaciones para calcular la velocidad media en conductos rugosos:

- Para canales

$$V = \frac{V^*}{k} \times \ln \frac{11R}{K}$$

- Para tuberías

$$V = \frac{V^*}{k} \times \ln \frac{13.4R}{K}$$

Como se puede observar, ambas ecuaciones son muy parecidas y pueden remplazarse por otra que considere el promedio aproximado de los coeficientes de $\frac{R}{K}$ (Rocha 2007: 77), obteniéndose la siguiente expresión:

$$V = \frac{V^*}{k} \times \ln \frac{12R}{K}$$

Donde:

K : Rugosidad absoluta.

Finalmente, para que una expresión de velocidad involucre ambos casos, velocidad en conductos lisos y rugosos, se adaptó ambas expresiones en una sola, obteniéndose la siguiente fórmula:

$$V = \frac{V^*}{k} \times \ln \frac{6R}{\frac{K}{2} + \frac{\delta}{7}}$$

Esta expresión de velocidad media, tal como muestra el Dr. Arturo Rocha en el texto referido, se adecua para darle forma a la ecuación de Chezy, como se muestra a continuación:

$$V = \frac{V^*}{k} \times \ln \frac{6R}{\frac{K}{2} + \frac{\delta}{7}} = \frac{\sqrt{gyS}}{k} \times \ln 10 \times \log \frac{6R}{\frac{K}{2} + \frac{\delta}{7}}$$

$$V = \frac{\sqrt{g}}{k} \times 2.5 \times 2.3 \times \log \frac{6R}{\frac{K}{2} + \frac{\delta}{7}} \times \sqrt{RS}$$

$$V = 18 \times \log \frac{6R}{\frac{K}{2} + \frac{\delta}{7}} \times \sqrt{RS}$$

Comparando la expresión obtenida con la ecuación de Chezy:

$$V = C \times \sqrt{RS}$$

Como se puede observar, el coeficiente “C” de Chezy vendría estar representada por la siguiente expresión:

$$C = 18 \times \log \frac{6R}{\frac{K}{2} + \frac{\delta}{7}}$$

Asumiendo que la sub capa laminar “ δ ” es muy pequeña, debido a la altura de las piedras que se encuentran adheridas al fondo del canal, se considera que en el modelo físico ensayado el flujo de agua se desplaza a través de un contorno hidráulicamente rugoso, por lo que para nuestro caso la ecuación se simplifica como se muestra a continuación:

$$C = 18 \times \log \frac{6R}{\frac{K}{2}} = 18 \times \log \frac{12R}{K}$$

7.1.1. Estimación de la rugosidad absoluta “K”

Para poder estimar la rugosidad absoluta del modelo físico se consideró como base la definición de “K”, el cual corresponde al tamaño absoluto promedio de las irregularidades en el fondo del canal y que tiene un valor particular para cada material (Rocha 2007: 73). Es así que se midió la altura de cada piedra adherida a la base, las cuales se dividieron en tres clases, como se muestra en las siguientes tablas. Es importante mencionar que la altura de estas piedras fueron elegidas tomando en cuenta el rango de rugosidad “K” estimado inicialmente en el punto 10 del Capítulo III.

Tabla N° 29: Medición experimental de altura de piedras de "altura menor"

Piedras de altura menor		22	0.5	47	0.5
N°	Altura (cm) 0 a 0.6	23	0.6	48	0.6
1	0.6	24	0.5	49	0.5
2	0.6	25	0.6	50	0.6
3	0.5	26	0.6	51	0.6
4	0.6	27	0.5	52	0.5
5	0.5	28	0.5	53	0.4
6	0.6	29	0.5	54	0.5
7	0.5	30	0.6	55	0.5
8	0.5	31	0.4	56	0.5
9	0.6	32	0.4	57	0.6
10	0.6	33	0.3	58	0.6
11	0.6	34	0.5	59	0.4
12	0.6	35	0.5	60	0.5
13	0.6	36	0.4	61	0.6
14	0.6	37	0.4	62	0.6
15	0.6	38	0.6	63	0.4
16	0.6	39	0.4		
17	0.6	40	0.5		
18	0.6	41	0.6		
19	0.6	42	0.5		
20	0.6	43	0.6		
21	0.5	44	0.5		
		45	0.6		
		46	0.6		

Tabla N° 30: Medición experimental de altura de piedras de "altura media"

Piedras de altura media		21	1.2	45	1.3
N°	Altura (cm) 0.7 a 1.3	22	1	46	1.2
1	1.2	23	0.9	47	1
2	0.8	24	0.9	48	1.1
3	0.8	25	0.9	49	0.9
4	1.2	26	1	50	0.8
5	1	27	0.9	51	0.8
6	0.7	28	0.8	52	0.7
7	0.8	29	0.9	53	0.7
8	0.9	30	0.8	54	1
9	1.3	31	1	55	1
10	1.3	32	1	56	0.7
11	1.2	33	1.2	57	1
12	1.3	34	0.7	58	0.8
13	0.7	35	1.3	59	0.8
14	1	36	1.2	60	1.1
15	0.7	37	0.7	61	0.9
16	1.2	38	0.9	62	0.8
17	0.9	39	1	63	1
18	1	40	1.1	64	1
19	0.8	41	0.7	65	1.3
20	0.8	42	0.8	66	0.9
		43	0.8	67	1
		44	0.8	68	0.8

69	0.7
70	1.1
71	0.8
72	0.7
73	0.9
74	0.7
75	0.9
76	0.8
77	1.3
78	0.9
79	1.3
80	0.9
81	1.3
82	0.8
83	1.1
84	1.1
85	1
86	0.9
87	0.8
88	1.3
89	0.8
90	1
91	0.8
92	0.9
93	0.8

94	1.1
95	0.8
96	1.1
97	1.3
98	0.8
99	1
100	0.9
101	1
102	0.9
103	0.7
104	0.9
105	0.8
106	0.8
107	0.9
108	1
109	1.2
110	1.2
111	0.8
112	0.8
113	0.9
114	0.8
115	0.8
116	0.9
117	1.1
118	0.9

119	0.7
120	0.8
121	0.8
122	1.3
123	1
124	1
125	0.9
126	0.9
127	0.7
128	0.7
129	1.3
130	0.8
131	0.9
132	1.2
133	0.9
134	1.2
135	1.1
136	0.7
137	0.9
138	0.8
139	1.3
140	0.8
141	0.8

142	1.1
143	0.9
144	1.1
145	1.2
146	0.9



TABLA N° 31: Medición experimental de altura de piedras de “altura mayor”

Piedras de altura mayor			
N°	Altura (cm) 1.4 a 2.1		
1	1.4	16	1.4
2	1.6	17	1.5
3	1.5	18	1.4
4	1.4	19	1.7
5	1.6	20	1.6
6	1.4	21	1.6
7	1.6	22	1.6
8	1.5	23	1.6
9	1.4	24	1.5
10	1.5	25	1.5
11	1.9	26	1.5
12	1.7	27	1.9
13	2	28	1.5
14	1.5	29	1.4
15	1.6	30	1.7
		31	2
		32	1.7
		33	1.6
		34	1.4

Debido a que la altura de las piedras medidas representa una variable aleatoria cuya distribución de probabilidad puede ser asumida como una distribución normal, los límites del intervalo de confianza del 95% fueron calculados de acuerdo al procedimiento mostrado en el libro Estadística Descriptiva e Inferencial (Córdova 2003: 392):

$$I(\mu) = \left[\bar{x} \mp z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$$

TABLA N° 32: Variables estadísticas

Variabes estadísticas	
Media	0.93 cm
Desv. Estándar	0.35 cm
Intervalo de confianza del 95%	[0.88 cm - 0.97 cm]

Para estimar la “Altura de piedra en función del porcentaje”, se tomó las mediciones mostradas en las Tablas N° 29, 30 y 31 para calcular el porcentaje que representaba cada clase dentro del total de piedras contadas; luego de ello, se promedió los valores medidos de cada una. En un tercer momento se multiplicó dicho promedio por cada uno de los porcentajes obtenidos inicialmente; finalmente, para hallar el valor buscado se adicionaron los resultados obtenidos del procedimiento anterior. Los valores calculados se muestran en las siguientes tablas:

TABLA N° 33: Resumen de medición experimental de altura de piedras

	Piedras de altura menor	Piedras de altura media	Piedras de altura mayor
Cantidad	63	146	34
Porcentaje	26%	60%	14%
Promedio (cm)	0.53	0.95	1.59

Altura de piedra en función del porcentaje (cm)
0.93

El valor obtenido como “Altura de piedra en función del porcentaje” representa la rugosidad “K” de la piedra. Por otro lado, para hallar la rugosidad absoluta total de la base del modelo, también se tomó en cuenta la rugosidad aportada por la lámina de lija sobre la que se encuentran adheridas las piedras, a la cual se le asignó un valor de $K=0.1$ cm.

Para estimar la rugosidad absoluta total de la base de nuestro prototipo, conformada por una lámina de lija y piedras adheridas a esta, se estimó el área que ocupaban las piedras en 10 cm de largo de la base, resultado del producto de dos dimensiones medidas en planta de cada piedra en esta área. Luego, una vez obtenido este valor, se restó dicho valor del área total, con lo cual se obtuvo un estimado de área donde la lámina de lija estaría descubierta.

Con ambos valores de áreas obtenidas, tanto el área que ocupa la piedra como el que ocupa la lija, se obtuvo un porcentaje de cuanto representaba cada valor. Finalmente, estos valores fueron multiplicados por el valor de rugosidad “K” de cada elemento y sumados entre sí para hallar la rugosidad absoluta total para la base del modelo físico. A continuación se muestra la tabla de resultados obtenidos.

TABLA N° 34: Estimación experimental de la rugosidad absoluta en el modelo

	Rugosidad K (cm)	Porcentaje de área que ocupa
Piedra	0.93	36%
Lija	0.1	64%

Rugosidad Absoluta total - K_m (cm)
0.40

7.1.2. Cálculo del coeficiente “C” de Chezy

Como se mencionó al inicio de esta sección, se asumió que la sub capa laminar en la base es muy pequeña debido a la altura de las piedras que se encuentran adheridas a esta, por lo cual se considera un contorno hidráulicamente rugoso, por lo que se utilizó la siguiente expresión para calcular “C”:

$$C = 18 \times \log \frac{12R}{K}$$

Donde, el radio hidráulico “ R_m ” se calculó con el tirante “ y_m ” medido a los 150 cm del punto de descarga (4.86 cm) presentado en la Tabla N° 27, como se muestra a continuación:

$$R_m = \frac{A_m}{P_m}$$

A_m : Área mojada en el modelo

P_m : Perímetro mojado en el modelo

El área se calculó de la siguiente forma:

$$A_m = 0.048 \text{ m} \times 0.19 \text{ m}$$

$$A_m = 9.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

El perímetro se calculó de la siguiente forma:

$$P_m = 0.19 \text{ m} + 2 \times (0.048 \text{ m})$$

$$P_m = 0.287 \text{ m}$$

Con los resultados obtenidos, se obtuvo el siguiente valor de radio hidráulico:

$$R_m = 0.032 \text{ m}$$

Luego, los valores obtenidos de radio hidráulico “ R_m ” y rugosidad absoluta “ K_m ”, fueron reemplazados en la ecuación para el cálculo del coeficiente “ C_m ” de Chezy en el modelo, como se muestra a continuación:

$$C_m = 18 \times \log \frac{12R_m}{K_m} = 18 \times \log \frac{12 \times 0.032 \text{ m}}{0.004} = 18 \times 1.98 = 35.68$$

7.1.3. Cálculo del coeficiente de fricción de Manning “ n_p ” del prototipo

De acuerdo a la semejanza hidráulica realizada en el punto 10 del Capítulo III, en la cual se obtuvo que el coeficiente de Chezy “ C ” del modelo y del prototipo es el mismo, por lo cual a continuación se procederá a calcular el coeficiente de rugosidad de Manning a partir del valor “ C ” calculado anteriormente.

Asumiendo que el flujo en el canal tiene fronteras hidráulicamente rugosas, para el cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning “ n_p ” del prototipo se utilizará la siguiente relación:

$$C_p = \frac{R_p^{1/6}}{n_p}$$

Para el valor del radio hidráulico “ R ”, se utilizó el mismo valor calculado anteriormente con el tirante medido a los 150 cm de distancia, el cual denominaremos “ R_m ” (radio hidráulico del modelo)

$$R_m = 0.032 \text{ m}$$

Considerando la escala utilizada para la elaboración del modelo físico, el radio hidráulico del prototipo es:

$$R_p = R_m \times 6.8$$

$$R_p = 0.218 \text{ m}$$

Con el valor obtenido procedemos a calcular el coeficiente de rugosidad de Manning “ n_p ” para el prototipo.

$$35.68 = \frac{0.218^{1/6}}{n_p}$$

$$n_p = 0.022$$

El valor obtenido de coeficiente de rugosidad, es el que deberá tener el canal a escala real para reproducir el fenómeno de resalto hidráulico observado en el modelo físico.

7.2. Dimensiones del prototipo

De acuerdo a las mediciones realizadas, las cuales se muestran en la Tabla 27 y en el video que se encuentra en el CD anexo, se puede observar que luego del resalto hidráulico producido se genera un tramo con ondulaciones. Donde se puede observar un flujo con tirante de agua más uniforme a partir de los 100 cm de distancia medidos a desde el punto de descarga. Por lo mencionado anteriormente, se puede afirmar que la longitud mínima que debería tener el canal de disipación, para las condiciones de

rugosidad, caudal y dimensiones del canal estimadas, es de 6.8 metros considerando la escala de 6.8 a 1,

Además, considerando que el valor máximo de altura medida experimentalmente fue la del tirante conjugado $y_{2m} = 6.36 \text{ cm}$, la altura de las paredes del canal de disipación deberán tener como mínimo 45 cm, considerando la escala utilizada de 6.8 a 1, más 30 cm de borde libre, mínimo requerido de acuerdo al Design of Small Canals Structures (Aisenbrey et al. 1978).

Con el tirante medido a los 150 cm, presentado en la Tabla N° 27 ($y_m = 4.86 \text{ cm}$) se puede estimar el tirante que se espera en el prototipo, de acuerdo a la escala 6.8 a 1.

$$y_p = 0.0486 \text{ cm} \times 6.8 = 0.33 \text{ m}$$

Con este valor se puede calcular la velocidad que se tendría en el prototipo y el número de Froude que se esperaría en el mismo:

$$0.6 \text{ m}^3/\text{s} = V_p \times (1.30\text{m} \times 0.33\text{m})$$

$$V_p = 1.399 \text{ m/s}$$

Con el valor de velocidad obtenido se calcula Fr_p :

$$Fr_p = \frac{1.399\text{m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.33 \text{ m}}}$$

$$Fr_p = 0.79$$

El valor de número de Froude es igual al hallado para el modelo, lo cual confirma lo que inicialmente se asumió inicialmente para los cálculos de semejanza hidráulica, que el número de Froude en el modelo y en el prototipo es el mismo.

Por otro lado, tal como se realizó en el ensayo experimental, se puede utilizar piedras angulosas, las cuales deberán estar adheridas a la base del canal. Ello se puede lograr embebiendo las mismas, 70% de su altura, en una base de concreto. Además, estas piedras deberán estar uniformemente repartidas a lo largo de la base según las siguientes recomendaciones.

- Para obtener el tamaño de piedras a colocar en el prototipo, partiremos de que el coeficiente de rugosidad de Chezy es el mismo tanto para el modelo como para el prototipo, como se muestra a continuación:

$$C_m = C_p$$

Tomando en cuenta que:

$$C = 18 \times \log \frac{12R}{K}$$

Reemplazando esta expresión en la igualdad planteada:

$$18 \times \log \frac{12R_m}{K_m} = 18 \times \log \frac{12R_p}{K_p}$$

De donde se obtiene

$$\frac{R_m}{K_m} = \frac{R_p}{K_p}$$

$$K_p = K_m \times \frac{R_p}{R_m}$$

$$\text{Tamaño de piedras} = 0.93\text{cm} \times 6.8 = 6.3 \text{ cm}$$

A este valor se le adiciona el 70% de la altura obtenida, la cual quedará embebida en el concreto para evitar que la fuerza de flujo arrastre la misma, por lo cual la altura de las piedras a ser colocadas deberán ser de 11 cm en promedio.

- La distribución de piedras medida en el modelo es de 33 piedras en 0.019 m² (1736 piedras por m²), por lo cual en el prototipo se requeriría:

$$1736 \frac{\text{piedras}}{\text{m}^2_m} = 1736 \frac{\text{piedras}}{\text{m}^2_m} \times \frac{1\text{m}^2_m}{(6.8 \times 6.8)\text{m}^2_p} = 38 \frac{\text{piedras}}{\text{m}^2_p}$$

A continuación se muestra la Tabla N° 35, la cual presenta las dimensiones finales del canal de disipación.

TABLA N° 35: Dimensiones del canal de disipación

	Modelo	Prototipo
Caudal (m³/s)	0.005	0.6
Longitud Mín. (cm)	100	680
Altura Min. (cm)	6.36+4.41 (Borde libre)	75
Base (cm)	19	130
Coef. de Rugosidad, n	0.016	0.022

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan conclusiones y recomendaciones que se pudieron obtener de los ensayos realizados.

CONCLUSIONES

1.- Respecto a la carga sobre el tubo de descarga:

Como se puede observar en la Tabla N° 2, presentada en el punto 6.1, se puede afirmar que el resultado obtenido para el cálculo de carga de agua sobre la tubería de descarga, según lo indicado en el Hydraulic Design of Highway Culverts (Norman et al. 2001), reproduce de forma más cercana lo observado en el laboratorio. Ello se debe a que presenta menor variación respecto al valor obtenido experimentalmente ya que involucra más variables permitiendo precisar su cálculo.

Por otro lado, se ha calculado el valor de la variable " C_d " para obtener la carga medida experimentalmente, de acuerdo a lo indicado en el texto "Ingeniería de los Recursos Hidráulicos" (Linsley y Franzini 1970), como se muestra a continuación:

$$h = \frac{1}{C_d^2} \frac{Q^2}{2g \times A^2}$$

Siendo " h " la carga de agua medida sobre el centro del orificio, calculada a continuación:

$$h = 0.034 \text{ m (Medición experimental)} + 0.044 \text{ m} \\ + 0.006 \text{ m (espesor de la pared de la tubería)} \\ h = 0.084 \text{ m}$$

Reemplazando los valores en la ecuación:

$$0.084 \text{ m} = \frac{1}{C_d^2} \times \frac{(0.005 \text{ m}^3/\text{seg})^2}{2 \times 9.81 \text{ m}/\text{seg}^2 \times (6 \times 10^{-3} \text{ m}^2)^2}$$

$$C_d = 0.65$$

Este valor obtenido para el coeficiente de descarga del orificio " C_d " es el que se debe aplicar para las condiciones similares presentadas en este ensayo, cuya entrada al tubo presenta borde agudo.

3.- Respecto a los ensayos realizados con variación de rugosidad en el canal de disipación.

TABLA N° 36: Comparación de números de Froude calculados en el modelo

Ensayo	Número de Froude (Fr)
Descarga de flujo en canal con base de rugosidad baja	4
Descarga de flujo en canal con base de rugosidad media	3.25
Descarga de flujo en canal con base de rugosidad alta	2.68
Descarga de flujo en canal con base empedrada	0.79

En la Tabla N°36 se puede observar que el número de Froude obtenido utilizando la base empedrada es menor que en los demás ensayos realizados. Este tipo de base ensayada posee una rugosidad absoluta $K_m = 0.4$ cm, por lo que podemos afirmar que la estimación realizada inicialmente para determinar el rango de rugosidades a utilizar en este ensayo es correcta.

4.- Respecto a los ensayos realizados haciendo uso de barreras en el canal de disipación.

TABLA N° 37: Comparación de resultados obtenidos en ensayos realizados con uso de barreras

Ensayo	Mediciones						
	Ubicación (cm)	Longitud de caída libre (cm)	Altura de flujo sobre la barrera (cm)	Longitud de turbulencia (cm)	Tirante de flujo desarrollado (cm)	Número de Froude	Pérdida de energía
Barrera simple en canal de disipación con base de rugosidad media	42	25	10.35	73	4.03	1.03	0.095
Barrera simple en canal de disipación con base de rugosidad alta	42	24	10.7	75	4.16	0.99	0.086
Barrera dentada en canal de disipación con base de rugosidad alta	28	23	7.36	64	3.45	1.31	0.084
Barrera empedrada en canal de disipación con base de rugosidad alta	56	23	8.93	49	3.72	1.17	0.085

En la Tabla N° 37 se muestra las barreras y la posición de estas donde se logró alcanzar un mayor tirante cuando el flujo se encuentra desarrollado, así como las características que presentó el flujo en cada ensayo.

De lo observado en los resultados presentados en gráficos y de acuerdo al cuadro comparativo, el uso de una barrera simple muestra una mayor eficiencia cuando esta se encuentra ubicada a los 42 cm del punto de descarga. Mientras que la barrera empedrada muestra una mayor eficiencia cuando esta es ubicada a los 56 cm del punto de descarga y la barrera dentada es ubicada a los 28 cm del punto de descarga.

Así mismo, en los resultados presentados de pérdida de energía se puede observar que la barrera simple provoca una mayor pérdida de energía (es más eficiente), así como un número de Froude menor que los demás disipadores utilizados, lo cual nos permite afirmar que este tipo de barrera tiene un mejor desempeño que las demás barreras ensayadas.

5.- Respecto al canal con base empedrada.

Se puede afirmar que se ha alcanzado el objetivo principal de obtener un flujo en régimen subcrítico, debido al valor de número de Froude obtenido, $Fr=0.79$, indica que el flujo observado se encuentra en este tipo de régimen.

Por otro lado, la similitud entre la medición experimental de la longitud de resalto hidráulico y la calculada de acuerdo al Gráfico N°17, se debe a que este gráfico fue elaborado en base a ensayos realizados en condiciones similares a las presentadas en este ensayo. Este resultado permite afirmar la confiabilidad en las mediciones realizadas.

6.- Con respecto al Froude esperado en el prototipo.

Se puede observar que el número de Froude calculado en el punto 7.2 ($Fr = 0.79$), el cual se esperaría en el prototipo, es igual al valor calculado para el modelo en el punto 6.6, lo cual confirma lo que inicialmente se asumió para los cálculos de semejanza hidráulica, que el número de Froude en el modelo y en el prototipo es el mismo.

Finalmente, se concluye que las dimensiones mostradas en la Tabla 35, muestra las dimensiones y rugosidad del canal de disipación mínimas necesarias para lograr un flujo en régimen subcrítico, el cual permitirá un correcto funcionamiento del aforador Parshall encontrado aguas abajo del canal de disipación.

RECOMENDACIONES

Respecto al dimensionamiento del modelo:

- Se debe tomar en cuenta las recomendaciones de experiencias pasadas obtenidas a través de bibliografía encontrada o fuente que haya realizado ensayos experimentales anteriormente.

Con respecto a los ensayos:

- Una vez que se haya instalado el modelo físico, previo a un ensayo formal, se debe observar el funcionamiento del mismo de forma detallada, para registrar las mediciones y organizar un procedimiento de ensayo. En esta tesis se siguió el protocolo mostrado en el Anexo 4.
- Sistematizar una matriz de procedimiento que muestre las mediciones que se deben realizar durante el ensayo, con el objetivo de no obviar ninguna medición que pueda resultar importante. La matriz realizada para los ensayos descritos en este documento, se encuentra en el Anexo 4.
- Se debe prever las actividades que se realizarán durante el ensayo para estimar el personal con el cual debemos contar para ese día. Para el caso de los ensayos descritos en esta tesis se estimó:
 1. Una persona que realizará las mediciones.
 2. Una persona que registrará las mediciones.
 3. Una persona que filmará el ensayo.

BIBLIOGRAFÍA

AISENBREY, A. J. Jr, R. B. HAYES, H. J. WARREN, D. L. WINSETT, R.B. YOUNG.

1978 *Design of Small Canal Structures*. Denver: U.S Department of Interior. Bureau of Reclamation.

BLAISDELL, Fred W., Charles A. DONNELLY y Kesavarao YALAMANCHILI.

1969 *Abrupt Transition from a Circular Pipe to a Rectangular Open Channel*. Minnesota: Universidad de Minnesota

CÓRDOVA ZAMORA, Manuel.

2003 *Estadística Descriptiva e Inferencial: Aplicaciones*. Quinta edición. Lima: Moshera, 2003

CHANSON H. y TOOMBES

1998 *Air-water flow structures at an abrupt drop with supercritical flow*. Brisbane: The University of Queensland. Consulta: 24 de Julio del 2012
(<http://staff.civil.uq.edu.au/h.chanson/reprints/icmf2.pdf>)

CHEREQUE VENDOR, Morán.

1987 *Hidraulica de Canales Abiertos*. Traducción de Juan G. Saldarriaga. Santa Fe de Bogotá: Nomos S.A.

CHOW, Ven Te.

1994 *Hidráulica de Canales Abiertos*. Traducción de Juan G. Saldarriaga. Santa Fe de Bogotá: Nomos S.A.

LINSLEY, Ray y Joseph FRANZINI

1970 *Ingeniería de los recursos hidráulicos*. Primera edición. México: CECSA

MACROCONSULT

2012 *Impacto Económico de la Minería en el Perú*. Consulta: 3 de octubre del 2012

(<http://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones-snmpe/impacto-economico-de-la-actividad-minera-en-el-peru.html>)

NORMAN, Jerome M., Robert J. HOUGHTALEN y William J. JOHNSTON.

2001 *Hydraulic Design of Highway Culverts*. Serie N° 5. Virginia: National Highway Institute.

REPLOGLE, John A., Albert J. CLEMMENS. Clifford A. PUGH

2004 *Hydraulic design of flow measuring structures*. Consulta: 03 de octubre del 2012

(http://www.media.rmutt.ac.th/media/e-Book/Engineer/Hydraulic%20and%20Pneumatic/Hydraulic%20Design%20Handbook/0071449590_ar021.pdf. 2004)

ROCHA, Arturo

2007 *Hidráulica de tuberías y canales*. Lima: EDUNI 2007

UNITED STATES. BUREAU OF RECLAMATION

2001 *Water Measurement Manual*. Tercera edición. Washington D.C.: U.S Department of Interior. Bureau of Reclamation

VERGARA SANCHEZ, Miguel

1993 *Técnicas de modelación en hidráulica*. México: Alfaomega.

