



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“MEJORAMIENTO HIDRÁULICO AL DESARENADOR Y REJILLA DE
LA TOMA CAUCASIANA DEL MODELO HIDRÁULICO REDUCIDO
DEL RÍO ARTURO IMPLEMENTADO EN LA FACULTAD DE
INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA”**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL, OPCIÓN HIDRÁULICA**

AUTOR: HERRERA PALACIOS DIEGO ISAÍAS

TUTOR: Ing. SALOMÓN JAYA QUEZADA, MSc.

QUITO - ECUADOR

2013

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico con todo el amor y cariño a mi madre Guadalupe Palacios, quien fue el eje fundamental para culminar mi carrera que gracias a todo su apoyo y esfuerzo se ve reflejado en este trabajo, también lo dedico a mi esposa Carolina que en el transcurso de todos estos años difíciles, ella estuvo a mi lado dándome todo su amor y respeto ya que sin ella no hubiese podido culminar este anhelo.

DIEGO HERRERA P.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Central del Ecuador la cual me abrió las puertas para cumplir este sueño tan deseado, a la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, a todo el personal docente, los cuales me guiaron con sus enseñanzas y conocimientos para ser un profesional de bien.

A mi tutor el Ingeniero Salomón Jaya el cual fue mi guía para la culminación de este proyecto sabiendo transmitir sus conocimientos de una manera muy acertada.

A mi Padre por todo su apoyo durante este largo tiempo, a mi tía Susana la cual me dio su cariño y amor sincero en los momentos más duros de mi vida, a mi hermano David el cual me supo guiar con sus consejos y su apoyo.

A todos mis tíos y familiares les agradezco de todo corazón, a Daniela Zapata por transmitir todos sus conocimientos hacia mí y a todos mis amigos.

Y un agradecimiento muy especial a mi amiga Mayra Narváez.

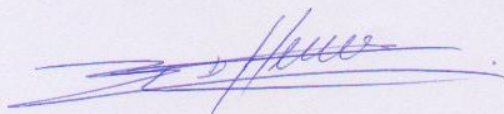
DIEGO HERRERA P.

AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL

Yo; DIEGO ISAÍAS HERRERA PALACIOS, en calidad de autor del trabajo de investigación realizada sobre **“MEJORAMIENTO HIDRÁULICO AL DESARENADOR Y REJILLA DE LA TOMA CAUCASIANA DEL MODELO HIDRÁULICO REDUCIDO DEL RÍO ARTURO IMPLEMENTADO EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA”** Por la presente autorizo a la Universidad Central del Ecuador, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o parte de los que contienen esta obra con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me corresponden, con excepción de la presente autorización; seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecidos en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

En la ciudad de Quito, a los 18 días del mes de Julio del 2013.



DIEGO ISAÍAS HERRERA PALACIOS

CC. 171696752-4

CERTIFICACIÓN

En calidad de Tutor del proyecto de Investigación: **“MEJORAMIENTO HIDRÁULICO AL DESARENADOR Y REJILLA DE LA TOMA CAUCASIANA DEL MODELO HIDRÁULICO REDUCIDO DEL RÍO ARTURO IMPLEMENTADO EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA”** presentado y desarrollado por el señor: **HERRERA PALACIOS DIEGO ISAÍAS**; previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, considero que el proyecto reúne los requisitos necesarios.

En la ciudad de Quito, a los 18 días del mes de Julio del año 2013.



Ing. Salomón Jaya Quezada MSc.

TUTOR DEL PROYECTO

INFORME SOBRE CULMINACIÓN DE TESIS

“MEJORAMIENTO HIDRÁULICO AL DESARENADOR Y REJILLA DE LA TOMA CAUCASIANA DEL MODELO HIDRÁULICO REDUCIDO DEL RÍO ARTURO IMPLEMENTADO EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIENCIAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICA”

TUTOR: Ing. Salomón Jaya Quezada, MSc.

FECHA: 18 de Julio del 2013

1. ANTECEDENTES:

El Director de la Carrera de Ingeniería Civil; solicita el informe posterior al análisis, dirección y orientación con Oficio FI-DCIC-2012 – 529 sobre el Plan y Temario del Trabajo de Graduación previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil; presentado por el señor **HERRERA PALACIOS DIEGO ISAÍAS**, que versa sobre: **“MEJORAMIENTO HIDRÁULICO AL DESARENADOR Y REJILLA DE LA TOMA CAUCASIANA DEL MODELO HIDRÁULICO REDUCIDO DEL RÍO ARTURO IMPLEMENTADO EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA”**

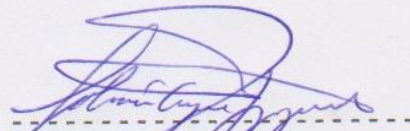
2. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

- El señor estudiante procede a la recolección de material bibliográfico necesario para el desarrollo del proyecto de investigación del diseño de rejilla y desarenador para tomas de fondo. Esta actividad consiste en la recolección y revisión crítica de los textos y de las publicaciones sobre este tema. Adicionalmente se revisó toda la información producto de la investigación para establecer cuál es la mejor alternativa de diseño para ríos de montaña.
- Se procede a hacer un ordenamiento y sistematización de las fórmulas además de los ábacos existentes para establecer una fuente de consulta para este tipo de tomas y cálculos de caudales en los vertederos.
- Se formula una metodología en la cual intervengan el cálculo de las dimensiones de rejillas de tomas de fondo de manera que se pueda alcanzar un fácil y adecuado dimensionamiento observando las distintas variables que rigen el diseño.

3. CONCLUSIÓN

Se considera que este trabajo de graduación es un valioso aporte para alcanzar un fácil dimensionamiento de este tipo de estructuras; mediante el cual; el ingeniero civil común, pueda solventar el diseño siguiendo esta metodología. Con lo que estos diseños podrán ser implementados en las obras de captación, que originalmente no tuvieron estos diseños o para futuros proyectos.

Atentamente,



Ing. Salomón Jaya Quezada MSc.
Profesor Principal
TUTOR



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA
 SECRETARÍA

RESULTADO DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

CARRERA DE Ingeniería Civil

Quito, 12 de Julio del 2013

Señor DIEGO ISAÍAS HERRERA PALACIOS

Tema: "MEJORAMIENTO HIDRÁULICO AL DESARENADOR Y
 REJILLA DE LA TOMA CAUCASIANA DEL MODELO HIDRÁULICO
 REDUCIDO IMPLEMENTADO EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIENCIAS
 FÍSICAS Y MATEMÁTICA"

CALIFICACIÓN:

TRIBUNAL	PROFESOR (A)	NOTA SOBRE VEINTE		FIRMA
		NUMERO	LETRAS	
PROFESOR TITULAR	JORGE ZURITA B.	17	DIEX Y SIETE	
PROFESOR TITULAR	JAIMÉ GUTIERREZ FABELLA	17	DIEXISIETE	
PROMEDIO		17	DIEXISIETE	

Dra. Katheryne Carrión Valdívieso
 SECRETARIA ABOGADA (E)



CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL.....	iv
CERTIFICACIÓN.....	v
INFORME DIRECTOR DE TESIS.....	vi
APROBACIÓN DE REVISORES.....	vii
LISTADO DE CONTENIDOS.....	viii
LISTADO DE TABLAS.....	xii
LISTADO DE FIGURAS.....	xiii
LISTADO DE FOTOGRAFÍAS.....	xiv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii

CAPITULO I

1. GENERALIDADES.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. OJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.2.1. OBJETIVOS GENERALES.....	5
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL FLUJO EN UN DESARENADOR Y REJILLA.....	5
1.4. ALCANCE DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL EN EL LABORATORIO.....	6

CAPITULO II

2. CONCEPTOS BÁSICOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO

HIDRÁULICO.....	8
2.1. DEFINICIÓN Y TIPOS DE OBRAS DE CAPTACIÓN.....	8
2.2. ASPECTOS TÉCNICOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UNA OBRA DE CAPTACIÓN.....	10
2.3. BASES DEL DISEÑO DE UNA TOMA DE FONDO (TIPO CAUCASIANA O TIROLESA).....	13
2.3.1 UMBRAL DE FONDO Y ESTRUCTURAS EN LA ZONA DE APROXIMACIÓN.....	14
2.3.2. REJILLA DE ENTRADA.....	15
2.3.3. GALERÍA DE RECOLECCIÓN Y DESARENADOR.....	17
2.3.4. DESRIPIADOR AL INGRESO O AGUAS ARRIBA DEL UMBRAL.....	19
2.3.5. CIMACIO DEL AZUD.....	20
2.3.6. ZAMPEADO.....	21
2.4. ESQUEMA GEOMÉTRICO DE LA TOMA.....	23

CAPITULO III

3. CRITERIOS DE DISEÑO HIDRÁULICO DEL DESARENADOR..... **24** |

3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO.....	24
3.1.1. ASPECTOS FLUVIOMORFOLÓGICOS.....	24
3.1.2. CAUDALES DE DISEÑO: MÍNIMO, DE OPERACIÓN Y MÁXIMOS.....	25
3.1.3. REJILLA DE ENTRADA.....	28
3.1.3.1. ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO DE LA REJILLA.....	29
3.1.3.2. DISEÑO DE LA REJILLA DEL MODELO.....	31
3.1.4. GALERÍA.....	33
3.1.5. DESARENADOR.....	41
3.1.5.1. CAMBIO DE PENDIENTE DEL DESARENADOR.....	47

3.1.6. AZUD.....	48
3.1.7. ZAMPEADO.....	38
3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51
3.3. PLANOS Y DETALLES DEL DESARENADOR Y REJILLA.....	52

CAPITULO IV

4. DESCRIPCIÓN DE LA MODIFICACIÓN DEL MODELO FÍSICO.....	53
4.1. OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA MODELACIÓN FÍSICA.....	53
4.2. RESTRICCIONES PARA EL USO DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA.....	55
4.3. ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	55
4.3.1. MAGNITUDES FÍSICAS.....	56
4.3.2. MAGNITUDES GEOMÉTRICAS.....	57
4.3.3. MAGNITUDES CINEMÁTICAS.....	57
4.3.4. MAGNITUDES DINÁMICAS.....	58
4.4. SIMILITUD DINÁMICA EXACTA Y RESTRINGIDA.....	60
4.5. SELECCIÓN DE LA ESCALA.....	74
4.5.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ESCALAS.....	74
4.6. INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA LA TOMA DE DATOS.....	75
4.7. CAUDALES MÁXIMOS DEL LABORATORIO PARA LA MODIFICACIÓN.....	75
4.7.1. LIMITACIÓN DE CAUDALES.....	75
4.7.2. ESPACIO FÍSICO.....	76

CAPITULO V

5. CONSTRUCCIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DEL DESARENADOR.....	77
5.1. INTRODUCCIÓN.....	77
5.2. PLANOS Y DETALLES DEL MODELO HIDRÁULICO DEL DESARENADOR Y REJILLA.....	77

5.3. MONTAJE.....	78
5.3.1. DESARENADOR.....	78
5.3.2. TOMA CON REJILLA DE FONDO O TIROLESA.....	79
5.3.3. AZUD Y REJILLA.....	80
5.4. EQUIPAMIENTO DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA.....	82
5.5. EXPERIMENTACIÓN.....	94
5.5.1. OBJETIVOS DE LA EXPERIMENTACIÓN.....	94
5.5.1.1. OBJETIVOS GENERALES.....	94
5.5.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	94
5.5.2. INTRODUCCIÓN.....	94
5.5.3. EQUIPOS Y MATERIALES.....	95
5.5.4. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA.....	95
5.5.5. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	97
5.5.6. CONCLUSIONES.....	98
5.5.7. RECOMENDACIONES.....	98

CAPITULO VI

6. ANÁLISIS DEL FLUJO EN UNA TOMA DE FONDO.....	100
6.1. COMPORTAMIENTO DE LA TOMA DE FONDO DISEÑADA POR EL GOBIERNO PROVINCIAL DE PICHINCHA.....	100
6.2. ENSAYOS DEL MODELO.....	104
6.3. PLANTEAMIENTO DE VARIANTES EN LA REJILLA PARA EL MEJORAMIENTO DEL FLUJO.....	106
6.3.1. DETERMINACION DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA PRIMERA VARIANTE (16%).....	107
6.3.2. DETERMINACION DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA SEGUNDA VARIANTE (19%).....	111

6.3.3. DETERMINACION DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA TERCERA VARIANTE (20%).....	114
6.3.4. DETERMINACION DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA PRIMERA VARIANTE (30%).....	117
6.4. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS (CRITERIOS DE COMPARACIÓN, ANÁLISIS SELECCIÓN).....	122
6.5. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA DE LA VARIANTE SELECCIONADA EFINITIVA.....	125
6.6. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL DESARENADOR.....	128
6.7. RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS EN EL MODELO CON SEDIMENTOS.....	133
CAPITULO VII	
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	138
7.1. CONCLUSIONES.....	138
7.2. RECOMENDACIONES.....	140
BIBLIOGRAFÍA.....	142
ANEXOS.....	144

LISTADO DE TABLAS

TABLA 3.1 TABLA DE PROBABILIDAD DE RECURRENCIA.....	26
TABLA 3.2 TABLA DE CAUDALES.....	28
TABLA 3.3 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LA REJILLA DE ENTRADA	33
TABLA 3.4 CÁLCULO DEL DISEÑO DE LA GALERÍA.....	35
TABLA 3.5 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LA GALERÍA DE GASTO VARIABLE.....	40
TABLA 3.6 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL DESARENADOR.....	44
TABLA 3.7 CANAL DE LAVADO.....	45

TABLA 3.8	COORDENADAS DEL PERFIL CREAGER.....	49
TABLA 4.1	MAGNITUDES FÍSICAS PARA EL MÉTODO DE FROUDE.....	73
TABLA 4.2	VALORES DE PARÁMETROS SEGÚN DISTINTAS ESCALAS PARA EL MODELO HIDRÁULICO.....	74
TABLA 6.1	TABLA DE CAUDALES PARA PROTOTIPO Y MODELO.....	104
TABLA 6.2	TABLA DE CAUDALES Y SUS ALTURAS CORRESPONDIENTES PARA EL VERTEDERO RECTANGULAR CON CONTRACCIONES.....	105
TABLA 6.3	CALADOS OBTENIDOS EN EL PERFIL CREAGER (16%).....	107
TABLA 6.4	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA (16%).....	107
TABLA 6.5	CALADOS OBTENIDOS EN EL PERFIL CREAGER (19%).....	111
TABLA 6.6	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA (19%).....	111
TABLA 6.7	CALADOS OBTENIDOS EN EL PERFIL CREAGER (20%).....	114
TABLA 6.8	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA (20%).....	114
TABLA 6.9	CALADOS OBTENIDOS EN EL PERFIL CREAGER (30%).....	117
TABLA 6.10	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA (30%).....	117
TABLA 6.11	CAUDALES CALCULADOS CON EL VERTEDERO TRIANGULAR Y RECTANGULAR.....	120
TABLA 6.12	EFICIENCIA DE LA REJILLA.....	122
TABLA 6.13	CLASIFICACIÓN DE SEDIMENTOS.....	130
TABLA 6.14	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA CON UNA INCLINACIÓN DEL 20% CON SEDIMENTOS.....	132
TABLA 6.15	COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS (20%) CON Y SIN SEDIMENTOS.....	136

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1.1	UBICACIÓN DEL PROYECTO.....	4
FIGURA 2.1	CAPTACIÓN DE MANANTIAL.....	9
FIGURA 2.2	REJILLA DE FONDO VISTA EN PLANTA.....	12
FIGURA 2.3	PARTES DE LA TOMA DE FONDO VISTA EN PLANTA.....	15
FIGURA 2.4	DESARENADOR VISTA EN PLANTA.....	18
FIGURA 2.5	DESRIPADOR AGUAS ARRIBA DEL UMBRAL EN CORTE.....	20
FIGURA 2.6	CIMACIO DEL AZUD.....	20
FIGURA 2.7	SOLICITACIONES DEL AZUD.....	21

FIGURA 2.8 CÁMARA DE INSPECCIÓN LUEGO DEL AZUD.....	22
FIGURA 2.9 ESQUEMA GEOMÉTRICO DE LA TOMA.....	23
FIGURA 3.1 CURVA DE DURACION GENERAL	27
FIGURA 3.2 BARROTE DE LA REJILLA.....	24
FIGURA 3.3 REJILLA DISEÑO ORIGINAL.....	29
FIGURA 3.4 INCLINACIÓN AL 20% DE LA REJILLA DE FONDO.....	31
FIGURA 3.5 REJILLA DE ENTRADA.....	32
FIGURA 3.6 GALERÍA DE GASTO VARIABLE CORTE.....	33
FIGURA 3.7 GALERÍA VISTA EN PLANTA.....	34
FIGURA 3.8 GALERÍA DE GASTO VARIABLE CORTE LONGITUDINAL.....	34
FIGURA 3.9 CANALES DE TRANSICIÓN CORTE LONGITUDINAL.....	39
FIGURA 3.10 GALERÍA DE GASTO VARIABLE PLANTA.....	39
FIGURA 3.11 DIMENSIONES DE LA GALERÍA.....	40
FIGURA 3.12 CORTE TRANSVERSAL DESARENADOR.....	43
FIGURA 3.13 DESARENADOR VISTA EN PLANTA.....	44
FIGURA 3.14 CORTE TRANSVERSAL DESARENADOR.....	45
FIGURA 3.15 VISTA FRONTAL DE LA COMPUERTA DEL DESARENADOR.....	46
FIGURA 3.16 VISTA EN PLANTA DE LA COMPUERTA DEL DESARENADOR.....	46
FIGURA 3.17 CORTE TRANSVERSAL DE LA COMPUERTA DEL DESARENADOR.....	47
FIGURA 3.18 CORTE TRANSVERSAL VERTEDERO TIPO CREAGER.....	49
FIGURA 3.19 PERFIL CREAGER.....	50
FIGURA 3.20 AZUD.....	50
FIGURA 3.21 ZAMPEADO.....	51
FIGURA 5.1 CURVA DE DESCARGA VERTEDERO RECTANGULAR CON CONTRACCIONES LATERALES.....	85
FIGURA 5.2 CURVA DE DESCARGA VERTEDERO TIPO CREAGER.....	89
FIGURA 5.3 CURVA DE DESCARGA VERTEDERO TRIANGULAR.....	93
FIGURA 6.1 TOMA DE FONDO (VISTA EN PLANTA).....	102
FIGURA 6.2 CORTE A-A DE LA REJILLA Y GALERÍA.....	102
FIGURA 6.3 VARIANTE DE INCLINACIÓN DE LA REJILLA (16%).....	106
FIGURA 6.4 VERTEDERO DE PARED DELGADA CON BORDE CIRCULA.....	106
FIGURA 6.5 VERTEDERO RECTANGULAR CON CONTRACCIONES LATERALES.....	108

FIGURA 6.6 EFICIENCIA VS CAUDAL (16%).....	109
FIGURA 6.7 VARIANTE DE INCLINACIÓN DE LA REJILLA (19%).....	110
FIGURA 6.8 VERTEDERO DE PARED DELGADA CON BORDE CIRCULAR...	110
FIGURA 6.9 EFICIENCIA VS CAUDAL (19%).....	112
FIGURA 6.10 VARIANTE DE INCLINACIÓN DE LA REJILLA (20%).....	113
FIGURA 6.11 VERTEDERO DE PARED DELGADA CON BORDE CIRCULAR..	113
FIGURA 6.12 EFICIENCIA VS CAUDAL (20%).....	115
FIGURA 6.13 VARIANTE DE INCLINACIÓN DE LA REJILLA (30%).....	116
FIGURA 6.14 VERTEDERO DE PARED DELGADA CON BORDE CIRCULAR..	116
FIGURA 6.15 EFICIENCIA VS CAUDAL (30%).....	117
FIGURA 6.16 VERTEDERO RECTANGULAR CON CONTRACCIONES LATERALES.....	120
FIGURA 6.17 VERTEDERO TRIANGULAR DE 60°.....	120
FIGURA 6.18 EFICIENCIA VS CAUDAL DE LA REJILLA.(16%), (19%), (20%), (30%).....	122
FIGURA 6.19 VERTEDERO RECTANGULAR CON CONTRACCIONES LATERALES (Q).....	133
FIGURA 6.20 VERTEDERO DE PARED DELGADA CON BORDE CIRCULA.....	133
FIGURA 6.21 EFICIENCIA DE LA REJILLA, INCLNACIÓN 20%, CON Y SIN SEDIMENTOS.....	135

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 1.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO.....	6
FOTOGRAFÍA 2.1 REJILLA DE FONDO.....	8
FOTOGRAFÍA 2.2 TOMA DE FONDO TIPO TIROLESA	14
FOTOGRAFÍA 2.3 REJILLA DE ENTRADA.....	16
FOTOGRAFÍA 5.1 MODIFICACIÓN DEL MODELO.....	78
FOTOGRAFÍA 5.2 MAMPOSTERÍA DE CONFINAMIENTO.....	79
FOTOGRAFÍA 5.3 MATERIAL DE RELLENO DEL DESARENADOR.....	80
FOTOGRAFÍA 5.4 CAMBIO DE BARROTOS DE LA REJILLA.....	81
FOTOGRAFÍA 5.5 ESTRUCTURA DE LA REJILLA.....	81

FOTOGRAFÍA 5.6 VERTEDERO RECTANGULAR CON CONTRACCIONES.....	82
FOTOGRAFÍA 5.7 LIMNÍMETRO.....	86
FOTOGRAFÍA 5.8 VERTEDERO TRIANGULAR DE 60 GRADOS.....	90
FOTOGRAFÍA 6.1 SITIO DE CAPTACIÓN.....	101
FOTOGRAFÍA 6.2 TRAMO DEL RÍO MODELADO.....	101
FOTOGRAFÍA 6.3 FLUJO DEL DESARENADOR CON PEQUEÑOS CAUDALES	103
FOTOGRAFÍA 6.4 FLUJO DE TRANSICIÓN AL INGRESO DEL DESARENADOR.	104
FOTOGRAFÍA 6.5 FUNCIONAMIENTO DE LA REJILLA Y CANAL DESRIPIADOR.....	129
FOTOGRAFÍA 6.6 COMPUERTA DEL DESARENADOR CON SEDIMENTOS....	129
FOTOGRAFÍA 6.7 FUNCIONAMIENTO DE LA REJILLA CON SEDIMENTO....	130
FOTOGRAFÍA 6.8 SEDIMENTOS RETENIDOS EN EL DESRIPIADOR.....	130
FOTOGRAFÍA 6.9 CANAL DE TRANSICIÓN.....	131
FOTOGRAFÍA 6.10 FUNCIONAMIENTO DE LA REJILLA CON CAUDAL MÁXIMO.....	131
FOTOGRAFÍA 6.11 FUNCIONAMIENTO DEL CANAL DE RECIRCULACIÓN...	132
FOTOGRAFÍA 6.12 COLOCACIÓN DEL DEFLECTOR.....	136

RESUMEN

“MEJORAMIENTO HIDRÁULICO AL DESARENADOR Y REJILLA DE LA TOMA CAUCASIANA DEL MODELO HIDRÁULICO REDUCIDO DEL RÍO ARTURO IMPLEMENTADO EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA”

El presente estudio se basa en la modificación de dos estructuras importantes en la toma de fondo del modelo físico reducido siendo el cambio de pendiente del desarenador y escoger la mejor alternativa de inclinación de la rejilla para mejorar la captación del caudal.

El mejoramiento hidráulico del desarenador redujo la velocidad del flujo en el canal para así asegurar la mayor retención de agregados finos.

En el rediseño de la rejilla el objetivo fue cambiar la sección y acomodo de los barrotes de circulares a cuadrados el cual redujo la obstrucción de la misma con sedimentos gruesos, que pasaron del canal del desripiador hacia la rejilla.

DESCRIPTORES:

DESARENADOR / TOMA CAUCASIANA / REJILLA TOMA DE FONDO / MODELACIÓN HIDRÁULICA / NUMERO FROUDE / SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN.

ABSTRACT

“HYDRAULIC IMPROVEMENT TO THE SAND SETTLER AND GRID OF THE CAUCASIAN TAKE THE REDUCED HYDRAULIC MODEL ARTHUR RIVER IMPLEMENTED IN THE FACULTY OF ENGINEERING, PHYSICAL SCIENCES AND MATHEMATICS”

The present study is based on the modification of two important structures in the background making reduced physical model being the change in slope of the sand trap and choose the best alternative of inclination of the grid to improve the capture flow.

Hydraulic enhancement of the different parts of the model is the sand settler to reduce the speed of flow in the channel so as to ensure increased retention of the fine aggregates.

In the redesign of the grid, the objective was to change the section of the bars of circular to square which reduced obstruction there of coarse sediments, which passed through the channel gravel settler.

DESCRIPTORS:

SAND SETTLER / CAUCASIAN TAKE / TAKE BACKGROUND GRID / HYDRAULIC MODELING / NUMBER FROUDE / SOLIDS IN SUSPENSION

“MEJORAMIENTO HIDRÁULICO AL DESARENADOR Y REJILLA DE LA TOMA CAUCASIANA DEL MODELO HIDRÁULICO REDUCIDO DEL RÍO ARTURO IMPLEMENTADO EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA”

Capítulo I

GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES.

Teniendo en cuenta que al ser de gran importancia dentro de la carrera de Ingeniería Civil el estudio de la modelación Hidráulica, es de gran importancia reforzar los conocimientos adquiridos por los estudiantes en el aula mediante la práctica en el laboratorio con modelos hidráulicos para poder analizar mejor los fenómenos hidráulicos.

Los modelos hidráulicos físicos al ser una representación de la realidad a escala, tanto cualitativa como cuantitativa, una bocatoma, es parte de un elemento muy acertado para analizar, describir y comprender el comportamiento del agua.

Por medio del oficio N.- 4168 – DG86 con fecha 31 de julio de 2012, dirigido al Economista Gustavo Baroja, Prefecto del Gobierno Provincial de Pichincha, el señor estudiante Diego Herrera Palacios, expresa el interés de realizar el dicho estudio y solicita a esta entidad que preste la facilidades necesarias como en la entrega de información requerida para la realización del mismo.

El Gobierno Provincial de Pichincha mediante oficio N.- HRU – 3632 – DG86, con fecha 9 de Junio de 2011, acepta que se realice la investigación de la toma de fondo del proyecto de riego Cayambe – Tabacundo y dispone al Ing. Franklin Burbano, Diseñador del Proyecto, brinde la facilidad del caso para realizar el

estudio, por medio del Director del proyecto Cayambe Tabacundo el Lic. Luis Jarrín, copias que se adjuntan en los anexos: 1.1, 3.1, 5.1, etc.

La presente investigación se enfoca en el cambio de pendiente del desarenador y rediseño de los barrotes de la rejilla de entrada y en la modelación hidráulica física de la toma de fondo del río Arturo ubicado en el proyecto de riego Cayambe - Tabacundo localizado dentro de los cantones Pedro Moncayo y Cayambe, en la provincia de Pichincha al Norte del Ecuador, en la actualidad se encuentra en ejecución, bajo la responsabilidad del Gobierno de la Provincia de Pichincha.

Tomando en cuenta que este modelo hidráulico está construido en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, elaborado por los estudiantes Narváez Mayra y Pérez Luis, culminándolo en Septiembre del 2011 y dando como resultados una inclinación de la rejilla al 19% con un ángulo de 10.73° con la horizontal, el desarenador tuvo una inclinación de 6% , el cual obtuvo los siguientes resultados: con una captación de sedimentos del 80%., la eficiencia de la rejilla es del 78% , caudal captado 42.42 l/s del ensayo del modelo sin sedimentos y una captación de 30 l/s del ensayo del modelo con sedimentos.

El Gobierno Provincial de Pichincha considera la ejecución de este proyecto para los beneficios que prestará a través del riego óptimo y permanente de aproximadamente 12.923 hectáreas netas en los cantones Pedro Moncayo y Cayambe. Este importante proyecto que contribuirá al desarrollo agropecuario e industrial del país.

Este proyecto tiene como propósito captar las afluentes de la vertiente oriental de la cuenca alta del río Azuela que son los ríos Arturo, Boquerón y San Pedro, para a través de un túnel conducirlos hacia la laguna de San Marcos. Con el propósito de elevar la cota. A un costado de la laguna se construirá una presa para la regulación de caudales, desde aquí se conducirá un determinado caudal para

luego, conjuntamente con el caudal del río La Chimba se abastecerá al canal de riego.

Este proyecto pretende garantizar la ocupación laboral local, incrementar los volúmenes de producción agrícola, aumentar los ingresos familiares por los beneficiarios del proyecto.

La FIGURA N°1.1 describe la ubicación del proyecto de riego Cayambe - Tabacundo.

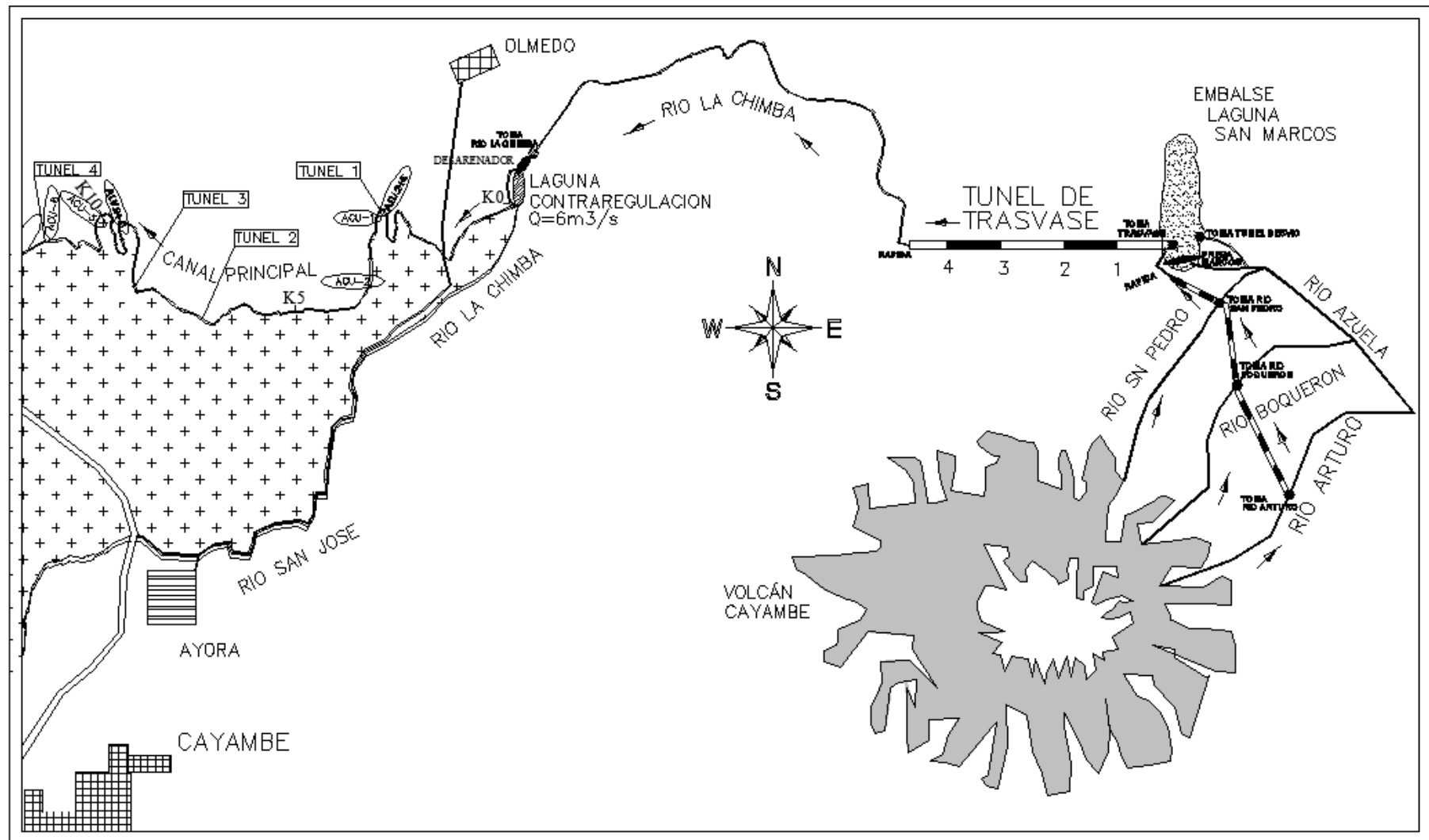


FIGURA 1.1. Ubicación del proyecto de riego Cayambe – Tabacundo, Fuente: Gobierno de la provincia de Pichincha

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1 OBJETIVOS GENERALES

- Mejorar el funcionamiento de la rejilla y del desarenador de un modelo físico reducido de la obra de toma del río Arturo del proyecto de riego Cayambe - Tabacundo implantado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar la rejilla del modelo hidráulico físico de la toma de fondo, para mejorar la captación del caudal del río Arturo.
- Determinar la eficiencia del desarenador a una pendiente del 3%.
- Determinar el funcionamiento de la rejilla ubicada al 16%, 19%, 20% y 30% de inclinación con la horizontal.

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL FLUJO EN UNA TOMA DE FONDO

Es muy importante dentro de la hidráulica las obras de captación y en particular las Tomas de Fondo tipo Caucasiona o Tirolesa, su rediseño, construcción y operación; además, al ser un tema de investigación en modelo hidráulico físico construido en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Central del Ecuador.

La implantación de una obra de toma de fondo, requiere de una significativa inversión de recursos económicos, tomando en cuenta el impacto ambiental que esta obra causará por la ubicación del río Arturo, es importante trabajar en conseguir resultados que ayuden a establecer factores de corrección como son éstos la variación del porcentaje de inclinación de la rejilla para aumentar el caudal de captación y asegurar la mayor recolección de sólidos, para mejorar el desempeño y funcionamiento de la obra y también de minimizar cualquier alteración del entorno natural en el sitio de implantación del proyecto. Para esto, la forma más efectiva de obtener estos factores, es reproducir en un modelo

hidráulico físico con características similares a las detalladas en los planos del diseño de esta obra de toma.

Será también una herramienta didáctica valiosa para la enseñanza práctica del diseño hidráulico relacionado a tomas caucasianas y sus elementos, para que los estudiantes y profesores utilicen este material para las diversas aplicaciones de la misma como para el conocimiento y funcionamiento de un desripador, desarenador, rejilla y en total el conocimiento de una toma.



FOTOGRAFÍA 1.1. Construcción del proyecto (tomado por Herrera Diego)

1.4. ALCANCE DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL EN EL LABORATORIO

El estudio en el modelo hidráulico físico de la toma de fondo construido en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, abarca la optimización de la captación en el río Arturo, afluente del sistema de riego Tabacundo, mediante el rediseño de los barrotes de la rejilla tomando la inclinación de 16%, 19%, 20% y 30% partiendo del diseño original

que tiene 19%. El resultado obtenido de la modelación dotó de parámetros de diseño que mejoró el funcionamiento del prototipo antes de su modificación.

De tal manera esto contribuirá con parámetros de diseño que aumenten el caudal de captación de la rejilla evitando su obstrucción con sedimentos y disminuya la velocidad del flujo en el canal del desarenador para el proyecto de riego Cayambe – Tabacundo.

Capítulo II

CONCEPTOS BÁSICOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO

2.1. DEFINICIÓN Y TIPOS DE OBRAS DE CAPTACIÓN.

OBRAS DE CAPTACIÓN:

Son obras que satisfacen las necesidades de la población para: consumo humano, riego, energía hidroeléctrica, agricultura, etc. El agua es obtenida de fuentes superficiales y subterráneas.



FOTOGRAFÍA 2.1. Rejilla de fondo

Las obras de captación son estructuras hidráulicas que se implantan directamente sobre las fuentes (ríos, lagunas, embalses, etc.), teniendo estas diferentes tipos de diseños según las necesidades de la población.

La obtención del agua de fuentes superficiales para ser utilizada en proyectos hidráulicos debe ser captada y direccionada hacia una obra de conducción.

El diseño de una obra de toma corresponderá a ser realizada en conjunto a las condiciones naturales del terreno y a la facilidad de accesos al lugar.

TIPOS DE OBRAS DE CAPTACIÓN:

Los tipos de obras de captación son de diferentes series, dependen básicamente del tipo de fuente que se disponga para captar; a continuación se cita unos cuantos tipos de obras:

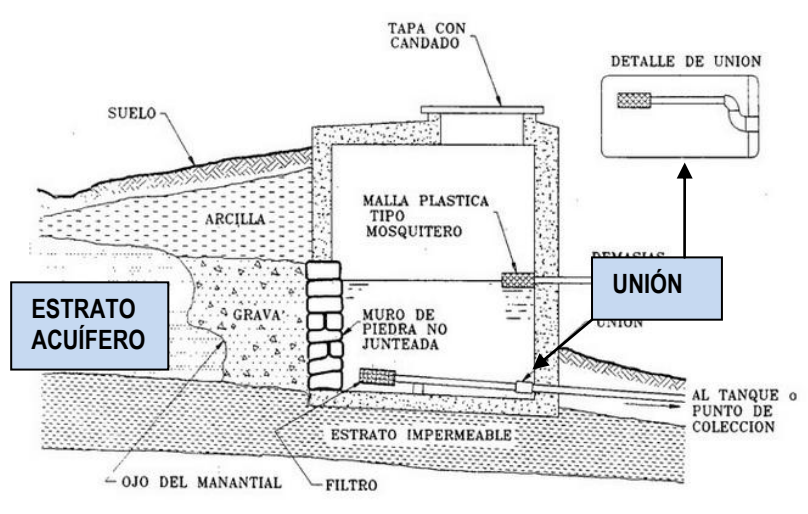
CAPTACION LATERAL

Este tipo de obra se implanta cuando se tiene una fuente con alta capacidad de caudal, debe evitarse su construcción en lugares propensos a la erosión, socavación e inestabilidad geológica, además es conveniente la construcción de muros que protejan la estructura.

OBRAS DE CAPTACIÓN SUPERFICIALES (RÍOS Y MANANTIALES)

La obra de toma superficial es el conjunto de estructuras que tiene por objeto desviar las aguas en una apertura en el curso natural, orientando el flujo hacia el sistema de conducción. Esto significa, que la utilización del agua a través de la obra toma tendrá consecuencias sobre el curso natural en cuanto a su morfología, régimen de escurrimiento y sobre el área de influencia en cuanto al equilibrio de sus suelos, nivel de aguas subterráneas, etc.

Por lo tanto, es necesario tener conocimiento previo al diseño hidráulico de las características y condiciones que ofrece el río o quebrada que se piensa aprovechar.



FIGURAA 2.1. Captación de manantial

CAPTACIÓN TIPO DIQUE-TOMA:

Se diseñan cuando nos encontramos con afluentes de poca sección transversal y bajo caudal. En este tipo de toma se hace necesaria la construcción de un dique de represamiento que ayude a captar el caudal requerido, se debe cuidar que no ingrese material grueso con la ayuda de una rejilla, además para evitar que entren sedimentos se debe diseñar la entrada del caudal de agua a la mayor altura posible.

GALERIA FILTRANTE:

Es una captación sencilla que se utiliza principalmente para captar bajos caudales como de agua subterránea, el agua que se capta es de buenas características de cantidad y calidad, no siempre su implantación es posible y de serlo se recomienda que sea construida en una de las orillas del cauce y en el mismo sentido del flujo. En la actualidad las galerías filtrantes son muy similares a un dren, puesto que su sistema es conformado por tubería perforada y sobre la cual existe un estrato de material permeable que funciona como un filtro a través del cual pasa el agua hacia la tubería que la conducirá hasta una cámara de almacenamiento desde la cual posteriormente será conducida para su aprovechamiento.

2.2. ASPECTOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UNA OBRA DE CAPTACIÓN

Son varios los aspectos necesarios para el dimensionamiento de una obra de captación, entre los principales se puede citar los siguientes:

ESTUDIOS TOPOGRÁFICOS

Los estudios topográficos permitirán la determinación de la forma del terreno y del cauce del agua; la selección del lugar donde el agua va a ser captada es un factor muy importante ya que interviene en la relación: cantidad de sedimentos y agua que captará en el sistema.

ESTUDIOS GEOLÓGICOS

Para conocer la geología del proyecto y sus diferentes aspectos como: morfología, estructuras, litología e hidrogeología; se ha determinado nominalmente o infiriendo las propiedades geomecánicas de las unidades geológicas a fin de obtener los criterios y elementos de comparación con los datos generados en investigaciones anteriores.

ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Ubicando los sitios en los cuales se ha previsto la ejecución de las obras, analizando los peligros geológicos (sísmico, volcánico y morfodinámico) asociados con el área del proyecto.

Los estudios geotécnicos deberán determinar las condiciones de estabilidad y resistencia admisible de los suelos, para considerar las precauciones necesarias en el diseño de las obras civiles.

ESTUDIOS HIDROLÓGICOS

En el estudio hidrológico del Proyecto de Riego Cayambe-Tabacundo se conocerá la disponibilidad del recurso hídrico mediante la medición de caudales o aforos en situ en diferentes épocas del año, imprescindiblemente en época de estiaje para determinar los valores de caudal máximo, mínimo y medio de la fuente, para así poder garantizar el servicio y evitar problemas relacionados con los niveles mínimos que aseguren la captación y de los máximos para que no peligre la estabilidad de las obras.

ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS

En las áreas de captación, conducción, regulación y transvase de cualquier proyecto, existen zonas con diferentes características hidrogeológicas.

Las rocas metamórficas, como basamento aflorante en los valles y la continuación del río Azuela, son rocas prácticamente exentas de agua subterránea, pueden presentar macroporividad formando acuíferos locales y baja transmisividad.

ESTUDIOS SEDIMENTOLÓGICOS

Este estudio permitirá conocer los sedimentos transportados por el cauce tanto en cantidad como calidad, así mismo el caudal líquido requerido para el transporte de sólidos.

Con los estudios sedimentológicos se obtendrá información del contenido normal de sólidos tanto en material de fondo como en suspensión, además del arrastre de los sedimentos durante las crecidas. El transporte sólido dependerá de las características de los ríos; el conocimiento de la variabilidad del transporte sólido y de su granulometría son de gran importancia para el diseño de la toma.

Es de gran importancia mencionar que el lado externo o cóncavo del cauce es el lugar más adecuado para implantar la captación debido a que el arrastre de fondo es llevado hacia adentro de la curva y la concentración de sedimentos es mayor en este punto que en otros puntos del cauce.

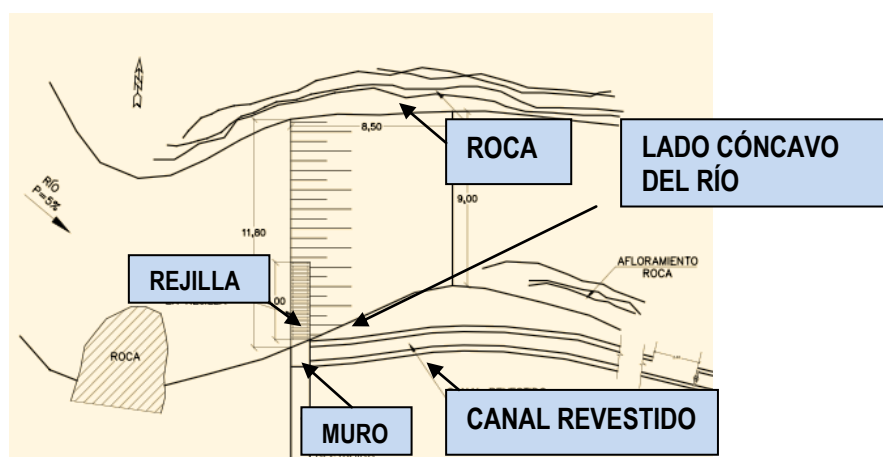


FIGURA 2.2. Rejilla de fondo vista en planta

Una vez obtenida la información necesaria como: hidrología, topografía, sedimentología, etc, son varias las condiciones de diseño, estas constan a continuación:

El caudal de la fuente debe ser mayor que el caudal de diseño para poder captar permanentemente este caudal y contar con el caudal ecológico.

- Captar el mínimo de sedimentos y disponer de medios apropiados para su evacuación
- Su ubicación debe presentar condiciones favorables desde el punto de vista estructural como constructivo

- Mantener aguas abajo el caudal líquido requerido para el transporte de sólidos y así evitar la sedimentación.

Con los estudios preliminares se procederá al diseño de la bocatoma esta consta de los siguientes elementos:

Compuerta: tiene por objeto elevar el nivel de las aguas de manera de permitir el desvío de los volúmenes de agua requeridos.

Las estructuras de control: permitirán la regulación del ingreso de las aguas a la obra de conducción.

Las estructuras de limpieza: serán elementos estructurales que puedan evacuar los sedimentos que se acumulan inmediatamente aguas arriba del órgano de cierre.

Las estructuras de seguridad: evacuarán las aguas que superen los volúmenes requeridos por el sistema receptor.

2.3. BASES DE DISEÑO DE UNA TOMA DE FONDO TIPO CAUCASIANA O TIROLESA

TOMA DE FONDO TIPO CAUCASIANA O TIROLESA

Las obras de toma con rejillas de fondo o tipo Tirol surgieron en la región europea del Tirol Sur en la frontera entre Austria y Alemania en el año de 1918, para satisfacer las necesidades de captación de agua para riego. Se construyen en el fondo del cauce natural o muy próximo al mismo para reducir su impacto sobre las corrientes torrenciales que transportan. Durante las avenidas, abundantes sedimentos o arrastres de fondo. Pueden disponer de uno o de dos sistemas de rejillas colocadas, generalmente, paralelas al flujo. Su función es retener, en uno o dos escalones, los sólidos de mayor tamaño, que el espaciamiento entre las rejas no permite el ingreso de los mismos y posibilitar el paso del agua, aún cargada con sólidos menores, piedras que puedan pasar y sedimentos más finos, a un canal o galería ubicado bajo la rejilla. La galería descarga, a su vez, a un canal de salida provisto, de un desarenador.



FOTOGRAFÍA 2.2. Toma de fondo tipo Tirolesa

Esta estructura se la implanta principalmente en los lechos de los ríos de montaña ya que estos transportan pocos sedimentos en suspensión y mayor arrastre de material de fondo como son la grava, el canto rodado, etc. Esta toma se la puede emplear en cauces que tengan pendientes longitudinales fuertes.

Las aguas son captadas mediante una rejilla, la cual está orientada en sentido perpendicular al flujo con los barrotes dispuestos en la dirección del flujo, la misma que permitirá el ingreso del caudal de captación y limitará el ingreso de los sedimentos, estará ubicada sobre la cámara o galería de captación que conduce el agua captada hacia el canal, el material sólido que ingrese a la cámara será evacuado mediante una compuerta de purga.

2.3.1.- UMBRAL DE FONDO Y ESTRUCTURAS EN LA ZONA DE APROXIMACIÓN

Las estructuras en las zonas de aproximación son muros de encauce que tienen la función de canalizar al río hacia la toma tirolesa y azud, protegiendo de esta manera la cámara de captación y demás estructuras situadas aguas abajo de la toma.

Además se puede considerar una pre cámara que tiene como objeto distribuir uniformemente el flujo en la rejilla de captación, en crecida constituyen un

volumen muerto, permitiendo de esta manera que el flujo transporte el material sólido sobre la rejilla de captación.

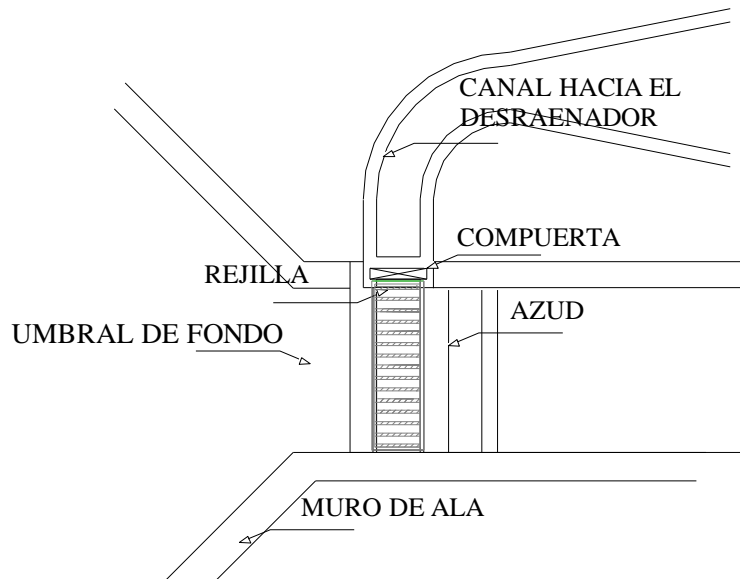


FIGURA 2.3. Partes de la toma de fondo vista en planta (Elaborado por Herrera Diego)

La pre cámara deberá tener un ancho de tal forma que en crecidas extremas ésta no afecte la solera del torrente aguas arriba es decir no produzca una socavación.

Los muros de encauce deben ser como mínimo de hormigón ciclópeo y estar diseñados y construidos con una cimentación sólida para evitar problemas de socavación y de abrasión.

2.3.2.-REJILLA DE ENTRADA

El agua que ingresará al sistema es captada a través de una rejilla colocada transversalmente a la corriente y sobre la cámara de captación, esta rejilla estará dispuesta de barrotes que pueden ser de sección circular, rectangular, trapezoidal (con la base mayor hacia arriba), sección tee, o una placa metálica con agujeros, dependiendo del tipo de sedimentos que arrastre la fuente se determinará la sección óptima de los barrotes de la rejilla, los mismos que deben ser fáciles de limpiar, no obstruirse con material de arrastre, no deformarse, y, permitir el paso

del caudal de diseño, con un área de rejilla cuyas dimensiones sean técnicamente adecuadas, estos barrotes estarán colocados paralelamente a la dirección del río.



FOTOGRAFÍA 2.3. Rejilla de entrada

La rejilla deberá tener una inclinación apropiada con la horizontal, ya que si es muy inclinada el agua no ingresará lo suficiente por la misma es decir se escurrirá sobre ésta.

De igual manera, si tiene poca inclinación el material de arrastre se quedará sobre la rejilla obstruyendo el paso del agua. Generalmente se recomienda una inclinación óptima con la horizontal entre 14° y 20% para facilitar el paso de los sedimentos.

Un factor determinante para establecer la capacidad de captación es el espaciamiento entre las barras paralelas, el mismo que dependerá del área disponible en el sector de la toma y del diámetro máximo de las partículas que se piense admitir a través de la rejilla, por lo que resulta fundamental conocer las condiciones de arrastre de sedimentos en el sector donde se implantará la obra de toma.

Para cursos de agua sujetos a régimen torrencial y cuando los cuerpos flotantes de gran tamaño puedan dañar a las rejas finas, debe ser prevista la instalación de rejas gruesas.

El espaciamiento de los barrotes puede ser de 7,5 cm a 15 cm, para las rejillas gruesas; y de 2 cm a 6 cm, para las rejillas finas. En la sección de paso, correspondiente al nivel mínimo de agua, el área de abertura de rejas debe ser

igual o superior a 1,7 cm²/l/min, de modo que la velocidad resultante sea igual o inferior a 10 cm/s, siendo las pérdidas de carga estimadas, admitida a la obstrucción del 50% de la sección de paso.

El material que no logre ingresar a la cámara de captación deberá continuar su movimiento hacia aguas abajo, sobre la rejilla por lo que el flujo deberá desarrollar velocidades que logren este efecto; en caso contrario, este material quedará dispuesto sobre la rejilla obstruyendo la sección efectiva del ingreso.

El área total de la rejilla se calculará considerando el área de las barras metálicas y el área efectiva del flujo de agua.

Al estar ubicada la rejilla transversalmente al curso de agua, gran cantidad de sedimentos arenas y rocas pequeñas entran por esta rejilla por lo que es necesario disponer de un desripador a continuación de la toma.

La longitud, la forma, espesor, espaciamiento e inclinación de la reja constituyen los parámetros de diseño que inciden directamente en la eficiencia del sistema de captación.

2.3.3.- GALERÍA DE RECOLECCIÓN Y DESARENADOR

Después de que el flujo ha superado la rejilla, se deposita en un canal recolector que se constituye en una cámara de captación, la que tiene la función de recibir y transportar el caudal que ingresa por la rejilla, así como el material sólido que logra pasar a través de ella; por tanto, la sección transversal del canal colector debe ser dimensionada para evacuar el caudal de diseño de la toma.

El chorro al llegar a la base de la cámara de captación produce un efecto similar al resalto hidráulico debido a que alcanza su máxima energía cinética y por lo tanto su mínimo tirante o bien por el impacto que produce sobre las paredes de la galería de recolección. Este efecto producirá turbulencia, variaciones oscilantes en el nivel del agua, por lo que el agua tendrá un proceso de aireación, este fenómeno

puede dar lugar a que los niveles de agua superen los límites físicos de la cámara, por lo que es necesario considerar lo indicado para el dimensionamiento de la misma.

La construcción de un desarenador es imprescindible en la salida de la toma tirolesa, a fin de evitar que la grava y arena que ingresa por la rejilla pase a los canales de conducción y los colmate, además de ocasionar el desgaste de la solera y muros de los canales. Se ubica entre la cámara de recolección y el canal de conducción y tiene la función de retener y evacuar el material de arrastre que ingresa por la obra de toma.

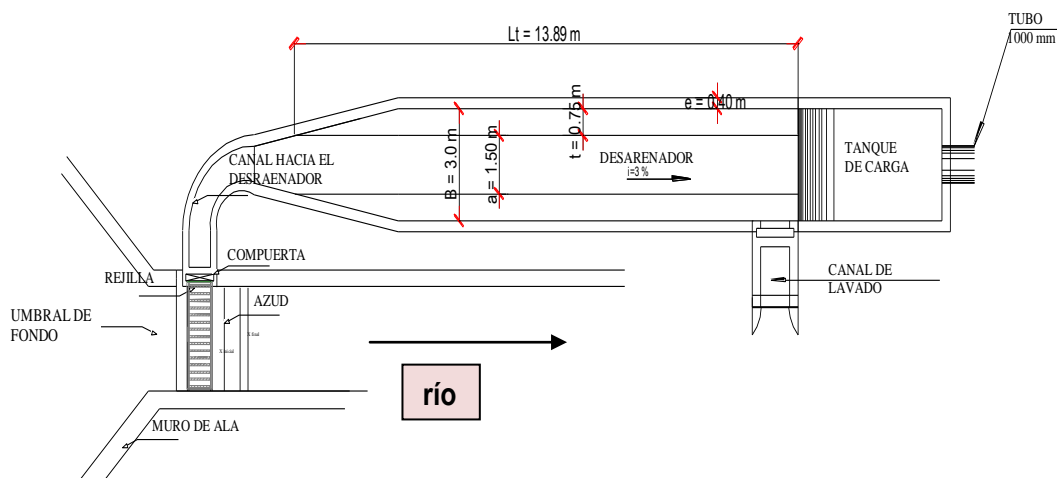


FIGURA 2.4. Desarenador vista en planta (Elaborado por Herrera Diego)

Es importante tomar en cuenta que las aberturas de la rejilla dependen directamente del diámetro de las partículas que son arrastradas hacia el desripiador.

El agua del desarenador captada pasará a través de un vertedero hacia la conducción, y la grava y demás material depositado en el fondo del desarenador serán evacuados por una compuerta que estará ubicada al final del desarenador donde opera un canal de desagüe, este canal deberá tener una pendiente tal que la velocidad del agua en el mismo sea capaz de arrastrar todo este material y se produzca el lavado del mismo.

Respecto a la sección transversal del canal, puede ser trapezoidal o rectangular.

Si el agua no puede ser evacuada de acuerdo a estas recomendaciones, se debe aumentar ya sea la pendiente del canal o la profundidad del desarenador.

La pendiente del canal debería ser por lo menos del 3% a fin de dar al agua la fuerza necesaria para mover del canal colector el material sólido que entre por la rejilla.

El cálculo se puede realizar en base a los lineamientos clásicos de las conducciones a superficie libre.

El ancho de la base de fondo deberá permitir las operaciones de limpieza mediante elementos manuales.

La galería del canal colector donde se recibe el agua que ingresa por la rejilla debe construirse de hormigón, preferiblemente armado, con la armadura de esta estructura soldada y trabada al marco de la rejilla.

2.3.4.- DESRIPIADOR AL INGRESO O AGUAS ARRIBA DEL UMBRAL

En este tipo de captaciones, al ser el agua proveniente de ríos de montaña y tener arrastre de material flotante como pueden ser hojas, ramas y demás material que puede producir un taponamiento en la rejilla, es necesario construir un canal desripiador aguas arriba del umbral, esto quiere decir antes de llegar a la rejilla, pero como esta toma generalmente es construida para pequeños caudales, el desripiador aguas arriba del umbral debe justificarse técnicamente ya que si no es así, su construcción se constituiría en una incorrecta inversión económica.

Además, en crecida el desripiador aguas arriba del umbral se convertiría en un volumen muerto, permitiendo de esta manera que el flujo transporte el material sólido y flotante sobre la rejilla de captación.

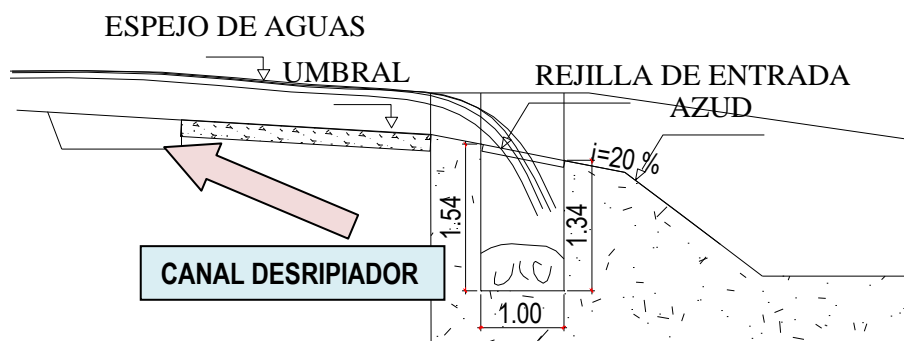


FIGURA 2.5. Desarripiador aguas arriba del umbral en corte (Elaborado por Herrera Diego)

2.3.5.- CIMACIO DEL AZUD

El agua del río que no es captada por la toma tirolesa se vierte por encima del azud construido en el lecho del río. Es por ello que, con la finalidad de aumentar su coeficiente de descarga, el azud debe tener, en lo posible, un perfil hidrodinámico.

Usualmente, este perfil se diseña con coordenadas de perfil Creager, con el objeto de que la presión producida en todos sus puntos sea casi nula, también es importante considerar que la estructura del azud debe conformar un solo cuerpo con la rejilla y la altura del azud sobre la cota superior de la rejilla debe ser pequeña, para que el agua pueda ingresar y el material de arrastre pase fácilmente sobre el azud.

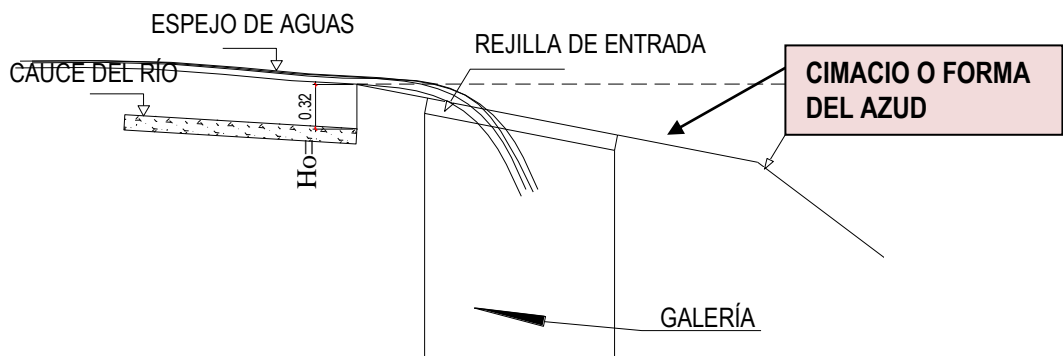


FIGURA 2.6. Cimacio del azud (Elaborado por Herrera Diego)

Las solicitaciones que deben tomarse en cuenta para el diseño del azud son el peso propio (W_a), peso del agua (W_w), empuje del agua (E_w), empuje del material aluvial tanto de aguas arriba como de aguas abajo ($E_{sólidos}$), y principalmente la subpresión (R_{sub}).

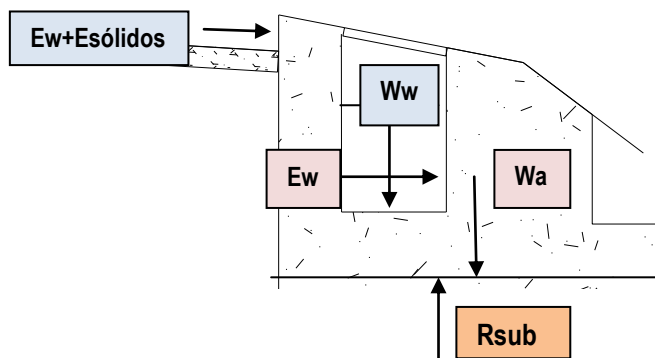


FIGURA 2.7. Solicitaciones del azud (Elaborado por Herrera Diego)

En la medida de las posibilidades el azud debe tener en su cresta (cimacio) hormigón armado o ser recubierto con piedra dura, ya que el hormigón ciclópeo sufre un desgaste muy acelerado. Se debe tener mucho cuidado con la dosificación.

Se debe colocar la obra de manera que la longitud del remanso no afecte a los cauces tributarios ubicados aguas arriba.

2.3.6.- ZAMPEADO

El zampeado es la estructura que estará a continuación del azud, unidos mediante una junta de construcción por lo que su diseño es totalmente independiente.

Con el propósito de dar mantenimiento y realizar la limpieza del canal colector, se puede construir una cámara de inspección a la salida del canal, de manera que la dimensión perpendicular del canal sobresalga como mínimo 0,50 m en cada lado del mismo. Su ancho debe ser, como mínimo, de 1,0 m y su profundidad debe permitir que se independice el flujo del canal colector del nivel del agua en la cámara. Estas dimensiones permiten que una persona con herramienta pueda trabajar sin dificultad al realizar la limpieza respectiva.

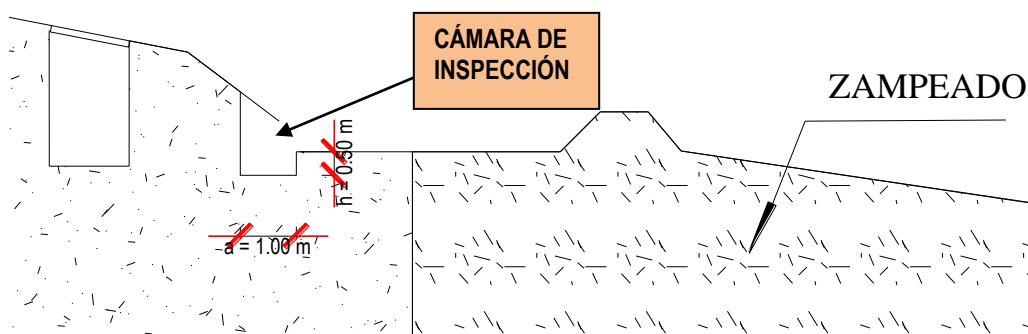


FIGURA 2.8. Cámara de inspección luego del azud (Elaborado por Herrera Diego)

Es el canal que recibe las aguas del canal colector y las lleva al desarenador, su longitud depende de las condiciones topográficas, principalmente de la pendiente y características del río.

En general, como un criterio de diseño, se sostiene que la longitud del canal de salida debe ser lo más corta posible debido a que el arrastre de sedimentos determinará la solera sufre un desgaste prematuro; sin embargo, todo depende de las condiciones topográficas.

2.4.- ESQUEMA GEOMÉTRICO DE LA TOMA

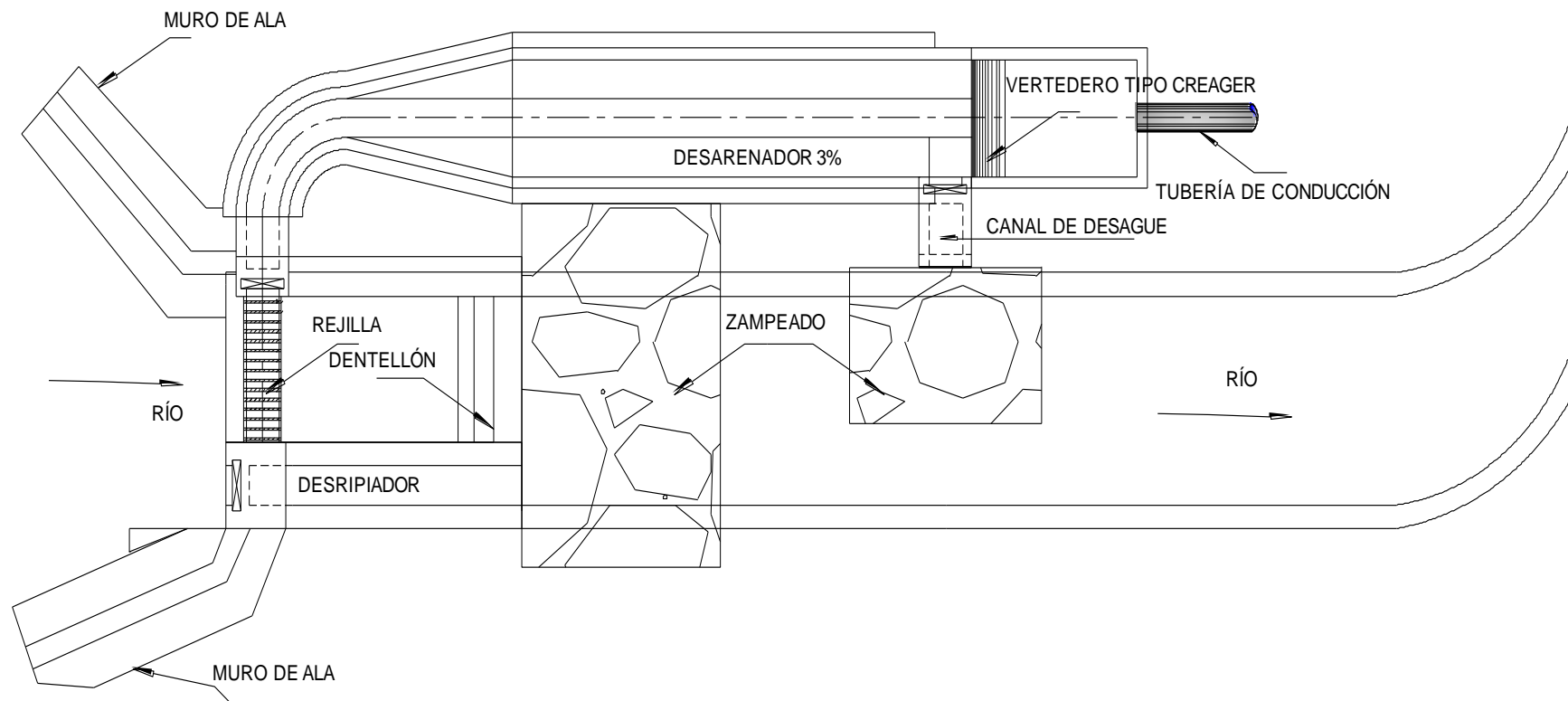


FIGURA 2.9.- Esquema geométrico de la toma. Elaborada por Herrera Diego.

Capítulo III

CRITERIOS DE DISEÑO HIDRÁULICO DE LA TOMA DE FONDO

3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO

La presente investigación al tener por objeto el rediseño del desarenador y la rejilla, la modelación hidráulica de una toma de fondo que ya se encuentra diseñada, en principio se pensó en hacer el estudio de manera general, pero se presentó la oportunidad de aplicarla al sistema de riego Cayambe -Tabacundo en la captación del río Arturo. Los diseños de la toma del río Arturo han sido realizados por los técnicos del Gobierno de la Provincia de Pichincha. A continuación se presentan los criterios de las unidades que conforman la obra de toma adoptados por el diseñador.

Aquí se expone de manera breve el desarrollo del diseño hidráulico de la toma al mismo tiempo que se recomienda, que para mayor profundidad de los mismos, revisar la referencia bibliográfica N.- 8 (Diseños definitivos).

3.1.1. ASPECTOS FLUVIOMORFOLÓGICOS

El río Arturo cuenta con un área de aportación de drenaje de 7.10 Km² a la cota 3500msnm, este río tiene una forma encañonada y posee pendientes muy pronunciadas según su topografía, tiene paredes semiempinadas, la pendiente promedio de esta cuenca supera el 35%, su vegetación son pajonales y los sedimentos depositados en el cauce son depósitos aluviales gruesos, parte de sus aguas provienen de los deshielos del glaciar Cayambe (¹). La cota de captación en el río Arturo es la 3487.60 m.s.n.m.

¹ Fuente: Gobierno de la provincia de Pichincha Estudios Hidrológicos complementarios de las cuencas de los ríos que aportan para el proyecto de riego Cayambe -Tabacundo, Tomo I, pag 18

3.1.2. CAUDALES DE DISEÑO: MÍNIMO, DE OPERACIÓN Y MÁXIMOS

Según el estudio hidrológico proporcionado por el Consejo Provincial de Pichincha, para la obtención de los caudales se utilizaron técnicas de similitud hidrológica en cuencas hidrográficas con similares características físicas, climáticas e hidrológicas de las que se disponía información continua y confiable, esto se realizó debido a la poca información histórica del río Arturo.

El caudal máximo generado en un período de 40 años (1965 – 2005) es:

$$Q_{\text{máx}}=1.73 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal medio generado en un período de 40 años (1965 – 2005) es:

$$Q_{\text{med}}=0.39 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal mínimo generado en un período de 40 años (1965 – 2005) es:

$$Q_{\text{mín}}=0.09 \text{ m}^3/\text{s}$$

FUENTE: Gobierno de la Provincia de Pichincha Estudios Hidrológicos complementarios de las cuencas de los ríos que aportan para el proyecto de riego Cayambe-Tabacundo, Anexo 3.1 Caudales mensuales generados (1965-2005)

Una obra hidráulica se proyecta para captar un cierto caudal que se lo denomina caudal de diseño, se lo obtiene de la curva de duración. Dependiendo para las necesidades que se vayan a cubrir, se recomienda los siguientes rangos:

Agua Potable	Q= 90% al 97%
Plantas Eléctricas	Q= 75% al 95%
Riego	Q= 70% al 90%

El agua que será captada del cauce del río Arturo será conducida por medio de tubería de acero hacia un túnel, el que posteriormente tomará el agua de los ríos

Boquerón y San Pedro, este caudal será conducido al embalse en la laguna de San Marcos, la misma que también tendrá aportaciones de los ríos La Chimba y Azuela, posteriormente el agua represada en la laguna servirá para el Proyecto de Riego Cayambe - Tabacundo y para el sistema de agua Potable Pesillo ubicado en la provincia de Imbabura.

La curva de duración resulta del análisis de la serie histórica de caudales generados, medios diarios en el sitio de captación de un proyecto de suministro de agua. Si la serie histórica es confiable, entonces, la curva de duración es representativa y puede utilizarse para pronosticar el régimen que se presentará durante la vida útil de la captación.

A continuación se presenta la información hidrológica y la curva de duración general, obtenida del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

TABLA N° 3.1. Tabla de probabilidad de recurrencia

% De Probabilidad	Caudal
100%	0.09
95%	0.18
90%	0.2
85%	0.22
80%	0.24
75%	0.26
70%	0.27
65%	0.28
60%	0.31
55%	0.33
50%	0.34
45%	0.37
40%	0.39
35%	0.4
30%	0.45
25%	0.49
20%	0.54
15%	0.58
10%	0.64
5%	0.74
1.15%	1.5
0%	1.73

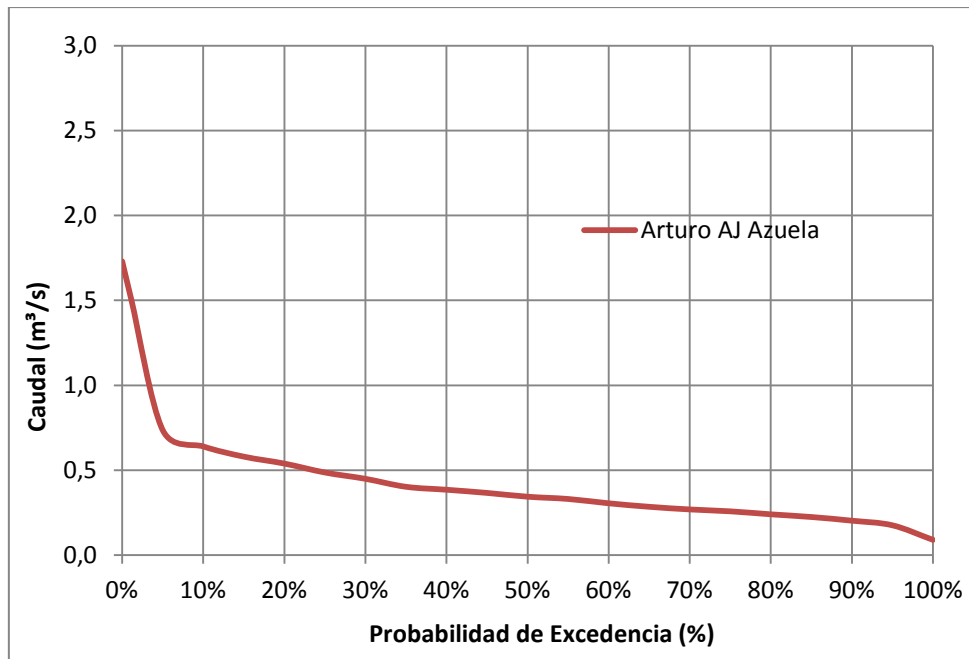


FIGURA 3.1. Curva de duración General Fuente: Gobierno de la provincia de Pichincha Estudios Hidrológicos complementarios de las cuencas de los ríos que aportan para el proyecto de riego Cayambe-Tabacundo, Tomo I, pag39.

El caudal que se captará del río Arturo no es utilizado directamente para el sistema de riego, ni el de agua potable mencionados, sino más bien sirve para garantizar el nivel del embalse de la laguna San Marcos.

Sin embargo al tratarse principalmente de un proyecto de riego el caudal de diseño se lo debería considerar:

$$Q_{\text{diseño riego}} \approx Q_{85\%} \text{ (recomendado)}$$

$$Q_{85\%} = 0.22 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal de diseño para las estructuras que conforman la bocatoma adoptado por el diseñador es de:

$$Q_{\text{diseño}} = 1.50 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \approx Q_{1.15\%}$$

De la curva de duración general obtenemos las probabilidades de excedencia del río Arturo con el caudal de diseño, y obtenemos que es el 1,15%, que quiere decir que el río tendrá un bajo porcentaje de sobrepasar el caudal de diseño.

Entonces al ser el caudal de diseño mayor al caudal aprovechable, el caudal de operación de la toma será el caudal medio disponible en el sitio de la implantación de la toma de río Arturo.

$$Q_{\text{operación}} = 0.39 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal ecológico, entonces, al ser el caudal de diseño mayor al caudal aprovechable, el caudal de operación de la toma será el caudal medio disponible en el sitio de la implantación de la toma del río Arturo.

$$Q_{\text{operación}} = 0.39 \text{ m}^3/\text{s}$$

A continuación la tabla 3.2 contiene los caudales

TABLA N° 3.2. Tabla de caudales

DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	VALOR	UNIDAD
Caudal Máximo	Q _{máx}	1.73	m ³ /s
Caudal Medio	Q _{med}	0.39	m ³ /s
Caudal Mínimo	Q _{mín}	0.09	m ³ /s
Caudal Ecológico	Q _{ecol}	0.04	m ³ /s
Caudal diseño recomendado	Q _{85%}	0.22	m ³ /s
Caudal diseño	Q _{1.15%}	1.5	m ³ /s
Caudal operación	Q _{operación}	0.39	m ³ /s

ELABORADO POR: Herrera Diego

3.1.3.- REJILLA DE ENTRADA

El diseño de la rejilla se lo hace con un caudal de diseño de 1,50 m³/s, la cota en la que la rejilla será instalada es en la 3488,00 m.s.n.m., con una inclinación del 20% es decir con un ángulo $\alpha=11.31^\circ$ con respecto a la horizontal. La rejilla estará ubicada en toda la longitud del azud.

Para obtener el ángulo de inclinación con la horizontal de la rejilla, hacemos una relación de los datos obtenidos del modelo inicial:

30% es decir con un ángulo $\alpha=16.70^\circ$

20% es decir con un ángulo $\alpha= X^\circ$

19% es decir con un ángulo $\alpha=10.73^\circ$

Con regla de tres, o a su vez con una interpolación sencilla y obtenemos el valor de $\alpha= 11.31^\circ$

3.1.3.1.- Elementos que intervienen en el diseño de la rejilla

Los elementos que intervienen en el cálculo de la rejilla son:

Barrotes: Los barrotes estarán colocados en forma paralela al flujo del cauce y tendrán una separación que no permita el paso de sedimentos muy grandes, en el presente estudio la forma adoptada de los barrotes es circular (diseño original) de hierro corrugado de diámetro $\Phi= 1''$ (2.54 cm).

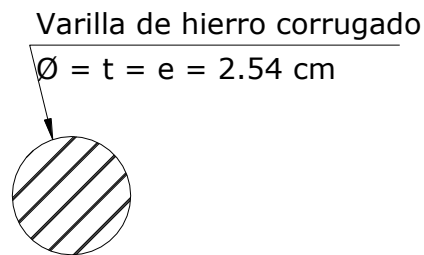


FIGURA 3.2. Barra de la rejilla diseño original

Al ser los barrotes de sección circular entonces:

$t = 2.54$ cm; altura o espesor de los barrotes

$e = 2.54$ cm; ancho de un barrote

$s = 5$ cm adoptado por el diseñador

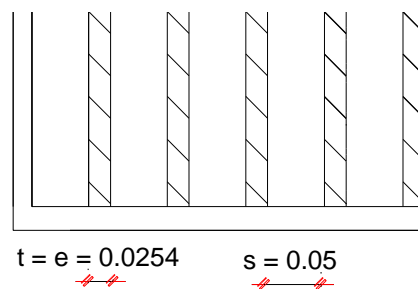


FIGURA 3.3. Rejilla diseño original

Coefficiente de obstrucción (K): El coeficiente de obstrucción es aquel que reduce el área total de la rejilla y lo transforma en área efectiva de captación debido al material que se incruste y está definido como:

$$K = (1 - f) * \frac{s}{s+t} \quad (3.1)$$

Siendo:

K = Coeficiente de obstrucción

f = 20%; porcentaje de obstrucción tomado por el diseñador (área obstruida por los sedimentos se recomienda del 15 al 30%)

s = 5cm espaciamiento entre barrotes

t = 2.54cm ancho o diámetro o espesor de los barrotes de la rejilla.

Entonces de los cálculos realizados por el diseñador con los valores asumidos y mediante el uso de la fórmula 3.1, se tiene que

$$K = (1 - 0.20) * \frac{0.05}{0.05 + 0.0254}$$

$$K = 0.531$$

Coefficiente de contracción (Cc): El coeficiente de contracción está principalmente en función del ángulo de inclinación de la rejilla con la horizontal α y se lo expresa como:

$$Cc = Co - (0.325 \times i) \quad (3.2)$$

Donde:

i = Tg α ; i= Tg 11.3°; i=0.2

e = espesor de barrote

s = espaciamiento entre barrotes $e/s = 2.54 \text{ cm} / 5 \text{ cm}$

Co = 0.6 para valores de $e/s > 4$

Co = 0.5 para valores de $e/s < 4$

Entonces se tiene que:

$e/s = 0.508$

$$C_o = 0.5$$

$$C_c = 0.5 - (0.325 * 0.2)$$

$$C_c = 0.535$$

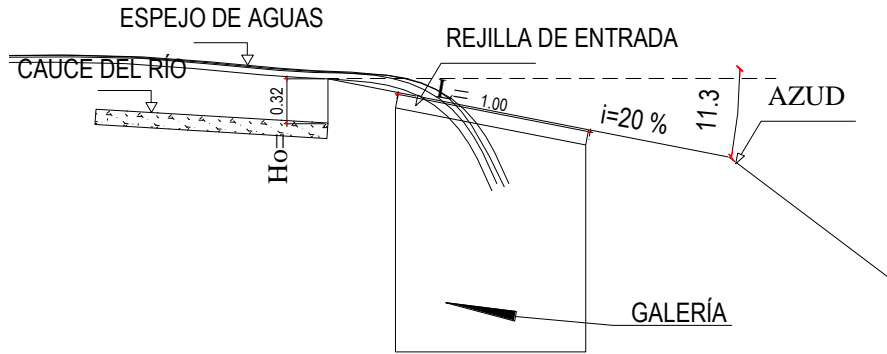


FIGURA 3.4. Inclinación al 20% de la rejilla de fondo (Elaborado por Herrera Diego)

Ancho de la rejilla (L): La longitud de la rejilla es adoptada por el diseñador en base a su experiencia del funcionamiento de obras similares, entonces es adoptada por el diseñador, $B=1\text{m}$, a partir de la longitud el ancho de la rejilla es calculado con la siguiente fórmula:

$$L = \frac{0.313 * Q}{(C * k)^{3/2} * B^{3/2}} \quad (3.3)$$

$$L = \frac{0.313 * 1.50}{(0.535 * 0.531)^{3/2} * 1^{3/2}}$$

$$L = 3.10 \text{ m}$$

3.1.3.2. Diseño de la rejilla del modelo

CÁLCULO DE ESPACIOS:

$B = 0.53 \text{ m}$ espacio disponible en la platina del azud del modelo

(diseño anterior).

$L_e = 0.012 \text{ m}$ longitud de espacios, obtenido del diámetro de sedimentos, para el modelo que pasan el tamiz # 3/8 (sedimentos color verde).

$$e = B/Le \quad e = \text{espacio entre barrotes}$$

$$e = \frac{530 \text{ mm}}{12 \text{ mm}}$$

$$e = 44.16 \quad \text{Asumimos 44 espacios}$$

NÚMERO DE VARILLAS DE LA REJILLA:

$$\# \text{ VARILLAS} = e - 1$$

$$\# \text{ VARILLAS} = 44 - 1$$

$$\# \text{ VARILLAS} = 43 \text{ varillas}$$

LONGITUD TOTAL:

$$LT = Le + Lv$$

Donde:

Le = longitud de espacios total (número de espacios * longitud de espacios)

Lv = longitud de varillas (número de varillas * espesor de varillas)

$$LT = (44 * 0.012 \text{ m}) + (43 * 0.008 \text{ m})$$

$$LT = 0.87 \text{ m}$$

PLATINA CIRCULAR Y RECTANGUNLAR

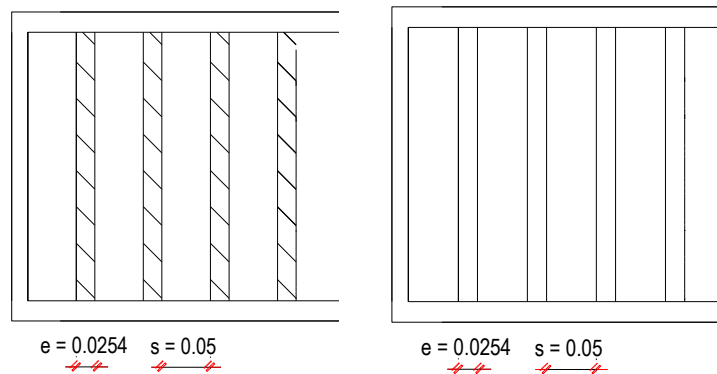


FIGURA 3.5. Rejilla de entrada de la captación (Elaborado por Herrera Diego)

TABLA N° 3.3. Elementos constitutivos de la rejilla de entrada.

DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	DIMENSIÓN	DIÁMETRO	UNIDAD
CAUDAL DISEÑO	Q	1.5		m ³ /s
LONGITUD	L	3.75		m
ANCHO	B	1		m
BARROTOS			0.0254	m
ESPACIO LIBRE ENTRE BARROTOS	s	0.05		m
INCLINACIÓN	α	11.31		°
COEF CONTRACCIÓN	Cc	0.535		
COEF OBSTRUCCIÓN	Co	0.531		

ELABORADO POR: Herrera Diego.

3.1.4.- GALERÍA

La galería constituye un canal para gasto variable ya que en el desarrollo de su longitud va incrementándose linealmente el caudal, el diseñador ha adoptado el criterio de Zamárin, este método es muy acertado ya que al tratarse de que la galería va aumentando su altura en el desarrollo de su longitud y al tener también un ancho constante, Zamárin propone obtener un caudal unitario, al dividir la galería en partes iguales.

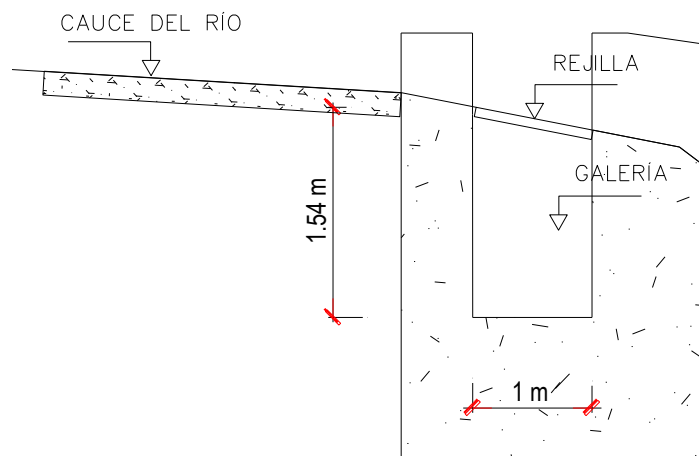


FIGURA 3.6. Galería de gasto variable corte transversal (Elaborado por Herrera Diego)

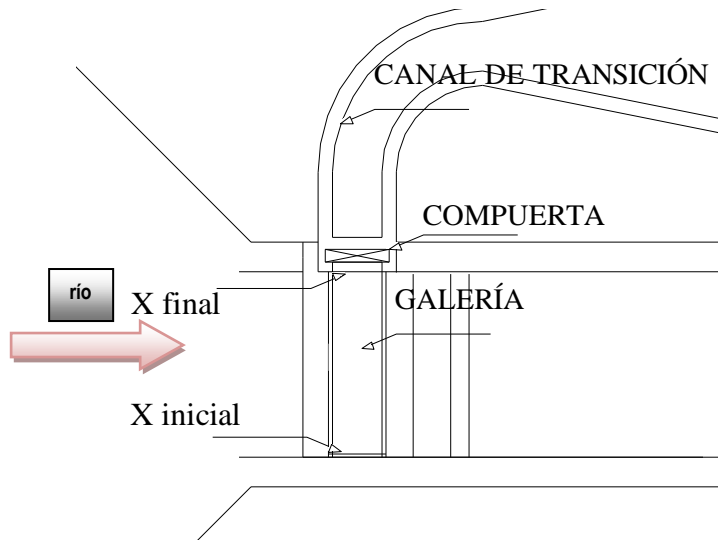


FIGURA 3.7. Galería vista en planta (Elaborado por Herrera Diego)

Entonces se tiene que:

$$Qx = \frac{Q}{L} * x \quad (3.4)$$

Donde:

$$Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L = 3.75 \text{ m}$$

$$Qx = \frac{1.5}{3.75} * x$$

$$Qx = 0.4 * x$$

Siendo x la distancia desde el comienzo de la galería.

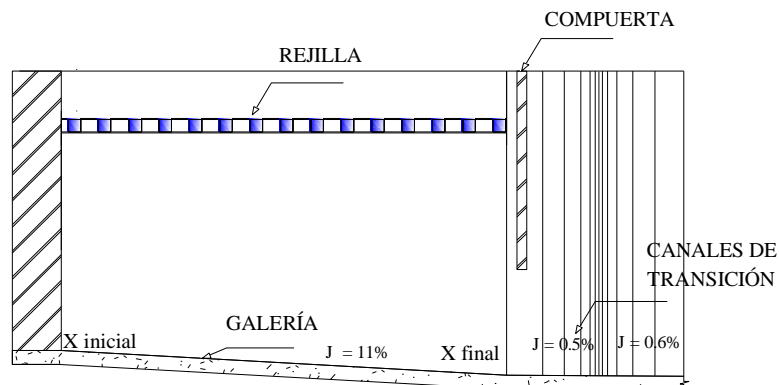


FIGURA 3.8. Galería de gasto variable corte longitudinal (Elaborado por Herrera Diego)

Por seguridad, para que el material de arrastre que pasa a través de la rejilla sea conducido hacia el desarenador, la velocidad en la galería debe ser obtenida con la siguiente expresión:

$$V_f > 3 * \sqrt{g * s} \quad (3.5)$$

Donde:

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$s = 0.05 \text{ m}$$

V_f = velocidad en la galería

$$V_f = 3 * \sqrt{9.8 * 0.05}$$

$$V_f = 2.10 \text{ m/s}$$

Para determinar la velocidad en cada punto se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_x = \frac{V_f - V_o}{b} * x + V_o \quad (3.6)$$

Donde la velocidad al inicio de la galería $V_o = 1 \text{ m/s}$, ya que las partículas no pueden tener una velocidad < 1 porque existiría sedimentación en la galería.

Entonces, reemplazando en la ecuación 3.4:

$$V_x = \frac{2.1 - 1}{3.75} * x + 1$$

$$V_x = 0.2933 * x + 1$$

Siendo x los valores desde el inicio de la galería hasta el final de la galería (0-3.75), se tiene la siguiente tabla:

TABLA N° 3.4. Cálculo del diseño de la galería.

X	Q	V	A=Q/V	d= A/L	P	R	R ^{4/3}	J	hf	Σ hf	V ^{2/2g}
0	0	1	0	0	1	0	0	~		0	0.051
0.5	0.2	1.15	0.174	0.17	1.35	0.129	0.065	0.013	0.006	0.006	0.067
1	0.4	1.29	0.309	0.31	1.62	0.191	0.110	0.009	0.005	0.011	0.085
1.5	0.6	1.44	0.417	0.42	1.83	0.227	0.139	0.009	0.005	0.015	0.106
2	0.8	1.59	0.504	0.50	2.01	0.251	0.158	0.010	0.005	0.020	0.128
2.5	1	1.73	0.577	0.58	2.15	0.268	0.173	0.011	0.005	0.026	0.153
3	1.2	1.88	0.638	0.64	2.28	0.280	0.184	0.012	0.006	0.032	0.180
3.5	1.4	2.03	0.691	0.69	2.38	0.290	0.192	0.013	0.007	0.039	0.210
3.75	1.5	2.10	0.714	0.71	2.43	0.294	0.196	0.014	0.007	0.046	0.225
(m)	(m ³ /s)	(m/s)	(m ²)	(m)	(m)	(m)	-	‰	(m)	(m)	(m)

FUENTE: Gobierno de la provincia de Pichincha, Diseños Hidráulicos Definitivos, Anexo Toma caucasiana, Galería.

Donde:

X = distancia desde el inicio de la galería.

Q = caudal de la galería.

V = velocidad del agua en la galería.

A = área de la sección ocupada por el agua.

d = calado.

P = perímetro de la sección del agua.

R = radio hidráulico.

J = pendiente longitudinal de la galería.

hf = pérdidas de carga .

Donde:

$$J = V^2 * n^2 / R^{4/3}$$

$$J = (1.15m/s)^2 * 0.025^2 / (0.129m)^{4/3} \quad n=0.025 \text{ adoptado por el diseñador}$$

$$J = 0.013$$

Donde:

$$hf = J * \Delta L \quad \Delta L = 0.5 \text{ m} \quad \text{adoptado por el diseñador}$$

$$hf = 0.013 * 0.5m$$

$$hf = 0.0063m$$

El calado al final de la galería está dado por:

$$d = \frac{Q}{L * Vf}$$

Donde:

d = calado en metros

$$d = \frac{1.5(\frac{m^3}{s})}{1m * 2.1(\frac{m}{s})}$$

$$d = 0.71 \text{ m}$$

Cálculo del tipo de flujo en la galería:

El tipo de flujo en la galería se obtiene por medio del número de froude, definido como:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{(g * d)}}$$

$$Fr = \frac{2.1 \text{ m/s}}{\sqrt{(9.81 \text{ m/s}^2 * 0.71 \text{ m})}}$$

$$Fr = 0.79$$

Donde v es la velocidad en el canal, g la asceleración de la gravedad y d es el calado en la galería. Observamos que el número de froude es menor a 1, entonces se trata de un flujo subcrítico.

La distancia total desde la rejilla hasta el fondo de la galería debe ser la suma de del calado al final de la misma, más el espesor de los barrotes, más la inclinación de la rejilla y más una altura de seguridad:

Espesor de los barrotes de la rejilla = 0.0254 m

Inclinación 20% = 1.00*0.2 = 0.20 m

Altura de seguridad (considerada por el diseñador en base a su experiencia)

Hs = 0.15m; donde: Hs = altura de seguridad

DTr = 0.0254 + 0.2 + 0.15 + 0.71= 1.09 m

Donde: DTr = distancia total desde la rejilla hasta el fondo de la galería.

Entonces la profundidad máxima será:

$$h_{\text{máx}} \text{ galería} = 1.09 \text{ m}$$

Cabe señalar que aunque del cálculo resulte $h_{\text{máx}} = 1.09\text{m}$ los diseñadores han adoptado

$h_{\text{máx}} = 1.95 \text{ m}$ para el prototipo.

CALCULO DE LA PROFUNDIDAD DE LA GALERÍA DEL MODELO

Escala del modelo: **1:04**

Espesor de los barrotes de la rejilla = 0.007 m 0.008 m por facilidad en el mercado.

Inclinación 20% = 0.25 m*0.2 = 0.05 m

Altura de seguridad (considerada por el diseñador en base a su experiencia)

$H_s = 0.04$ m; donde: H_s = altura de seguridad

$D_{Tr} = 0.008 + 0.05 + 0.15 + 0.09 = 0.30$ m

Donde: D_{Tr} = distancia total desde la rejilla hasta el fondo de la galería.

Entonces la profundidad máxima será:

$$h_{\text{máx}} \text{ galería} = 0.30 \text{ m}$$

$h_{\text{máx}} = 0.40$ m para el modelo. (valor conservador por motivos constructivos y de limpieza de la cámara).

Para el diseño de los canales que unirán la galería de recolección con el desarenador, y conociendo la rugosidad del hormigón, la pendiente, el caudal de diseño, y el ancho del canal, se procede al cálculo del coeficiente K (rugosidad según Bazin) que está expresado por:

$$K = \frac{Q \cdot n}{J^{1/2} \cdot B^{8/3}} \quad (3.4)$$

CANAL DE TRANSICIÓN 1

$$Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$B = 1 \text{ m}$$

$$n = 0.016$$

$$J = 0.5\%$$

$$K = \frac{1.5 \times 0.016}{0.05^{1/2} \times 1^{8/3}}$$

$$K = 0.339$$

CANAL DE TRANSICIÓN 2

$$Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$B = 1 \text{ m}$$

$$n = 0.02$$

$$J = 0.6\%$$

$$K = \frac{1.5 \times 0.02}{0.06^{1/2} \times 1^{8/3}}$$

$$K = 0.309$$

Con el valor calculado de K se procede a tomar de la tabla 12 – 6⁽²⁾ que se encuentra en el anexo 3.2 el valor de d/b , y se obtiene el valor de d que es la longitud del canal de transición.

$$d/b = 0.758$$

$$d/b = 0.702$$

De donde:

$$d1 = 0.758 \text{ m}$$

$$d2 = 0.702 \text{ m}$$

d = longitud del canal de transición en m

² Fuente: Diseño Hidráulico Sviatoslav Krochin. Tercera Edición, Octubre 2010, Pag 401, 402, 403, 404

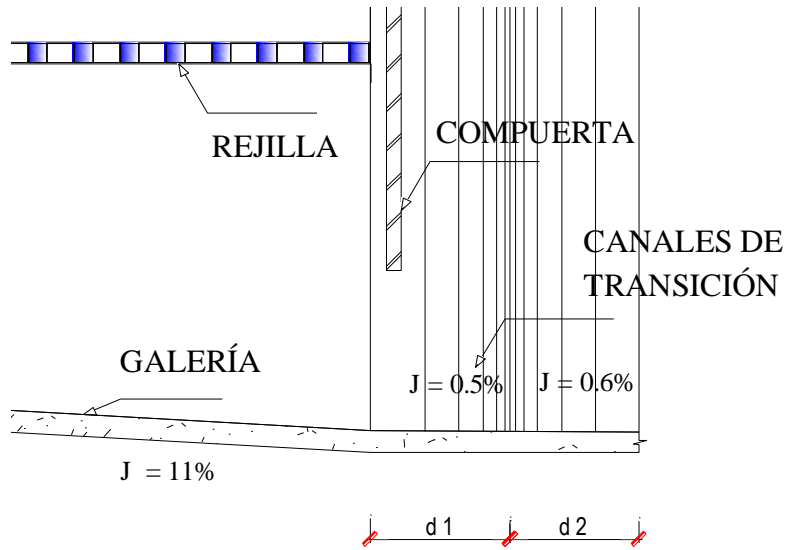


FIGURA 3.9. Canales de transición corte longitudinal (Elaborado por Herrera Diego)

En la figura 3.10, el gráfico 2 se tomó el valor mínimo de pendiente para un desarenador que es el 3%, para que las partículas avancen con el agua al momento de abrir la compuerta de limpieza.

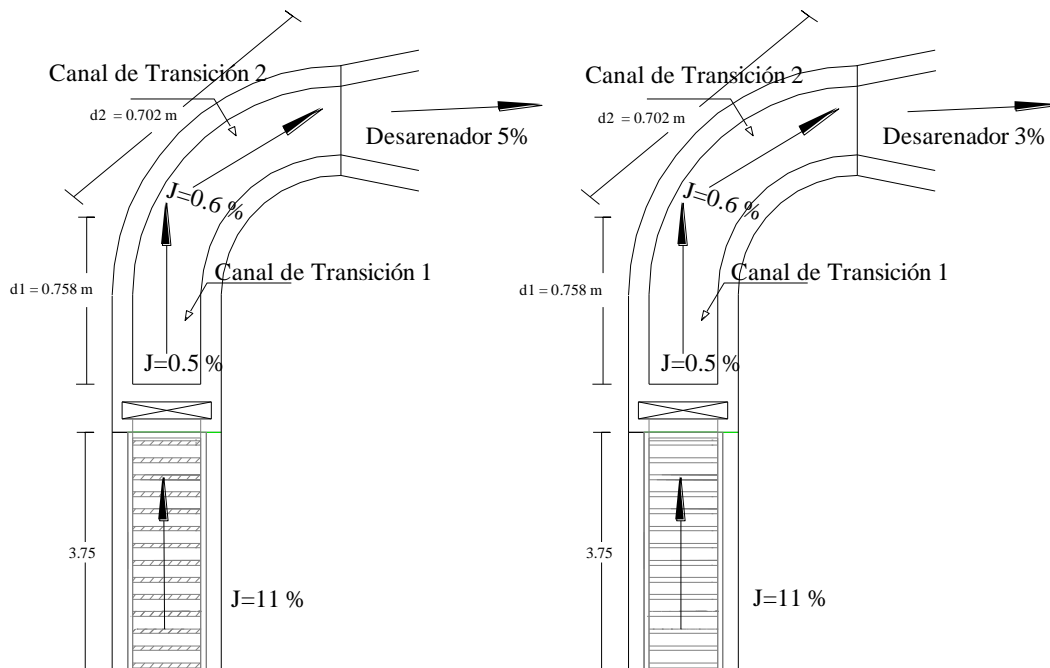


FIGURA 3.10. Planta galería de gasto variable (Elaborado por Herrera Diego)

TABLA N° 3.5 Elementos Constitutivos de la galería de gasto variable.

DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	DIMENSIÓN	UNIDAD
CAUDAL DISEÑO	Q	1.5	m ³ /s
LONGITUD	L	3.75	m
ANCHO	B	1	m
VELOCIDAD MEDIA	V	2.1	m/s
PROFUNDIDAD INICIO GALERÍA	H _o	1.54	m
PROFUNDIDAD FIN GALERÍA	H _f	1.95	m

ELABORADO POR: Herrera Diego.

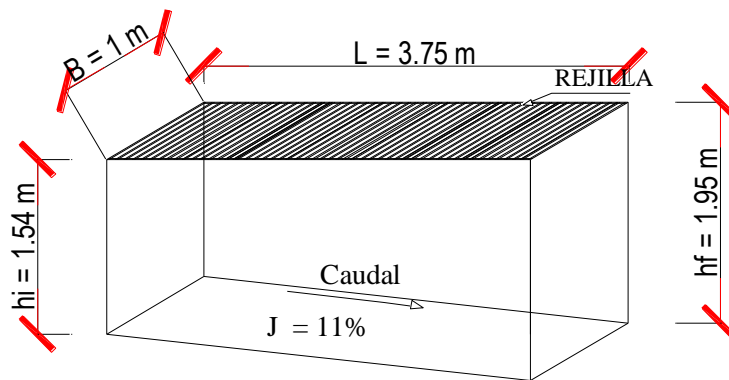


FIGURA 3.11. Dimensiones de la galería (Elaborado por Herrera Diego)

3.1.5.- DESARENADOR

El desarenador constituye un elemento indispensable en la obra de toma, ya que este tiene la función de retener los sedimentos con el fin de evitar su ingreso al sistema de conducción, el diseño de esta estructura según los estudios proporcionados por la Gobernación Provincial de Pichincha, se ha diseñado de la siguiente manera:



FOTOGRAFÍA 3.1. Desarenador doble del río Boquerón (Elaborado por Herrera Diego)

El caudal de diseño es $Q=1.5 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir el 100% del caudal de diseño, la velocidad asumida es $V= 0.2 \text{ m/s}$, ya que se toma velocidades entre los intervalos de 0.1 m/s a 0.4 m/s , en ríos con caudales menores a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ se toma de 0.1 m/s – 0.2 m/s con estos valores se procede a calcular el área de la sección y con la ecuación de continuidad se procede a calcular la altura del canal desarenador, luego se procede al cálculo de su longitud con la ecuación de Sokoloc⁽³⁾; para el canal de lavado se adoptan las condiciones necesarias para la velocidad $V>3 \text{ m/s}$, se procede al cálculo del radio hidráulico, posteriormente se calcula la rugosidad con la fórmula de Manning⁽⁴⁾ y la pendiente del canal mediante la ecuación de Chezy.

³ Fuente: Diseño Hidráulico Sviatoslav Krochin. Tercera Edición, Octubre 2010, Pag 128

⁴ Fuente: Diseño Hidráulico Sviatoslav Krochin. Tercera Edición, Octubre 2010, Pag 128, ecuación 12 - 16

La velocidad de sedimentación (w) está en función del diámetro de las partículas que ingresan al desarenador, en este caso el diámetro se lo toma $\Phi = 0.4\text{mm}$ y $w=4.320\text{ cm/s}$, este valor se lo toma de la tabla 6-1⁽⁵⁾ que se encuentra en el anexo 3.2.

$Q_{\text{diseño}} = 1.5\text{ m}^3/\text{s}$
 $V = 0.2\text{m/s}$ (impuesta)
 $w_f(\text{arena fina}) = 0.16\text{mm/s}$
 $w(\text{arena gruesa}) = 0.216\text{mm/s}$
 $w(\text{arcilla}) = 0.081\text{m/s}$
 $w(\text{asumida}) = 0.2\text{m/s}$

$\text{Area} = Q/V$
 $A = b * h$
 Entonces: $b = (Q / (v * h))$
 $b = Q / (h * V)$

$A = 1.5/0.2 = 7.50\text{m}^2$
 $1.50 / (h * 0.2)$

h (m)	b=1,50/(h*0,2) (m)
0.50	15.00
0.60	12.50
0.70	10.71
0.80	9.38
0.90	8.33
1.00	7.50
1.10	6.82
1.20	6.25
1.30	5.77
1.40	5.36
1.60	4.69
1.80	4.17
2.00	3.75
2.10	3.57
2.15	3.49
2.18	3.44
2.20	3.41
2.30	3.26
2.35	3.19
2.40	3.13
2.42	3.10
2.50	3.00

$L = 1,2 * (V / w) * h$
 $V = 0.2\text{ m/s}$
 $w = 4,32\text{cm/s} = 0.0432\text{ m/s}$
 $h = 2.50\text{ m}$
 $L = 13.89\text{ m}$
 $b = 3.00\text{ m}$

⁵ Fuente: Diseño Hidráulico Sviatoslav Krochin. Tercera Edición, Octubre 2010, Pag 127

Donde: h = altura del canal del desarenador.

b = base de la sección del canal.

L = longitud del desarenador.

V = velocidad de diseño del desarenador (0.1 – 0.4) m/s, para

Caudales menores a 5 m^3

w = velocidad de sedimentación para $\phi < 0.4 \text{ mm}$

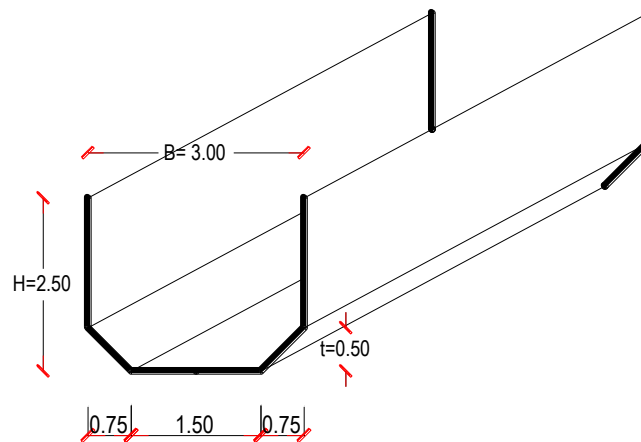


FIGURA 3.12. Corte transversal desarenador (Elaborado por Herrera Diego)

CANAL DE LAVADO DEL DESARENADOR

$$V \geq 3 \text{ m/s}$$

$$Q_{\text{diseño lav}} = 1,5 * Q \quad 2.25 \quad \text{m}^3/\text{s}$$

$$A1 = Q / V \quad 0.75 \quad \text{m}^2$$

$$a \quad 1.5 \quad \text{m}$$

$$t \quad 0.5 \quad \text{m}$$

$$h1 = (A1 + ((b-a)/2) * t) / b \quad 0.38 \quad \text{m}$$

$$A = ((b+a)/2) * V = \quad 0.45 \quad \text{m}^2$$

$$\text{Tan } a = \quad 0.67$$

$$a = \text{ATAN}(1,00) \quad 33.69$$

$$P1 = a + 2 * (t / \text{Sen } a) = \quad 3.30 \quad \text{m}$$

$$R = A1 / P1 = \quad 0.227$$

$$n = \quad 0.018$$

$$C = 1 / n R^{1/6} \quad 43.39$$

$$ic = (Q / (A * C * R^{1/2}))^2 \quad 0.058466637 \quad 5.846664$$

$$i \text{ adoptado} = \quad 5\%$$

$$Q = A * C * (R * i)^{1/2} \quad 3.467865249 \quad \text{aprox} = 2Q \quad \text{ok}$$

Donde:

V = velocidad mínima del canal desarenador.

Q_{dis lav} = caudal de diseño de lavado del desarenador = 1.5 * Q diseño

A_l = área de lavado del canal desarenador.

a = base menor de la sección del canal (trapezoidal).

t = altura de la sección trapezoidal.

h_l = altura de lavado de la sección trapezoidal.

A = área de la sección.

Pl = perímetro de lavado de la sección trapezoidal.

R = radio hidráulico de la sección.

n = coeficiente de rugosidad del hormigón.

C = coeficiente C.

i = pendiente del canal

Q = caudal de la sección

FUENTE: Gobierno de la provincia de Pichincha, Diseños Hidráulicos Definitivos, Anexo Toma caucasiana, Desarenador.

TABLA N° 3.6. Elementos constitutivos del Desarenador.

DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	DIMENSIÓN	UNIDAD
CAUDAL DISEÑO	Q	1.50	m ³ /s
VELOCIDAD DISEÑO	V	0.20	m/s
VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN	w	0.0432	m/s
LONGITUD	L	13.89	m
ANCHO	B	3.00	m
PROFUNDIDAD	H	2.50	m

ELABORADO POR: Herrera Diego

V = velocidad de diseño del desarenador (0.1 – 0.4) m/s, para

Caudales menores a 5 m³

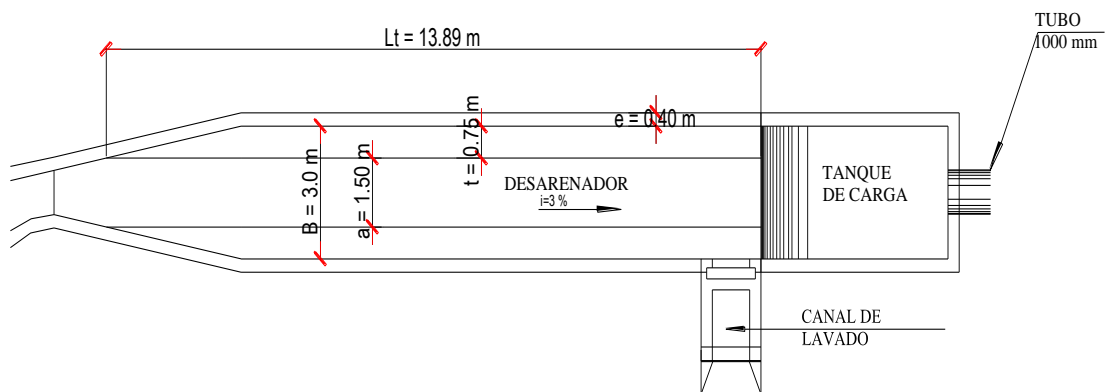


FIGURA 3.13. Desarenador vista en planta (Elaborado por Herrera Diego)

TABLA N° 3.7. Canal de Lavado.

DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	DIMENSIÓN	UNIDAD
CAUDAL DISEÑO	Q	2.25	m ³ /s
VELOCIDAD DISEÑO	V	3.00	m/s
PENDIENTE	J	5.00	%
LONGITUD TOTAL DESARENADOR	Lt	13.89	m
BASE	a	1.50	m
ALTURA	t	0.75	m

ELABORADO POR: Herrera Diego.

V = velocidad de diseño del canal desarenador (3 – 5) m/s, para canales con pendientes mayores al 4%.

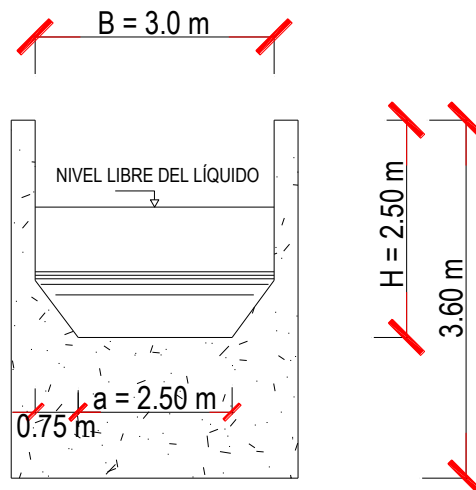


FIGURA 3.14. Corte transversal del desarenador (Elaborado por Herrera Diego)

Compuerta de limpieza del desarenador:

Esta sirve para la limpieza del material sólido que se deposita en la cámara de sedimentación, en la que la pendiente longitudinal debe variar entre el 2% al 6%, y la velocidad debe encontrarse entre 3 m/s a 5 m/s. Es usual también ubicar un canal directo con la finalidad de no interrumpir el paso del agua cuando se produce el lavado de la cámara.

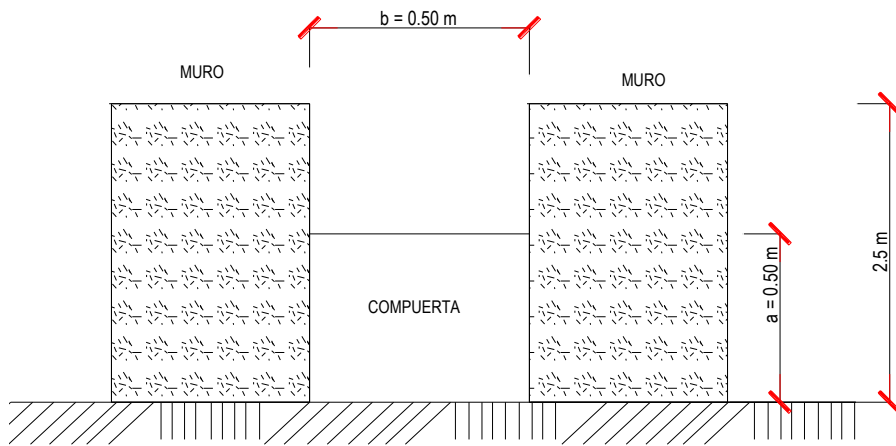


FIGURA 3.15. Vista frontal de la compuerta del desarenador (Elaborado por Herrera Diego)

Las dimensiones de la compuerta impuestas por el diseñador son $a=0.5\text{ m}$ y $b=0.5\text{ m}$, se asume el valor de $c=0.95$, de un rango entre 0.95 y 0.97, se obtiene el valor de $e=0.62$ de la tabla N.- 12 -1y con la fórmula del caudal⁽⁶⁾ se obtiene $Q=1.55\text{m}^3/\text{s}$ mayor que el caudal de diseño $Q=1.5\text{m}^3/\text{s}$ por lo que cumple la condición necesaria para soportar el empuje del agua, y se concluye que las dimensiones de la compuerta están correctas.

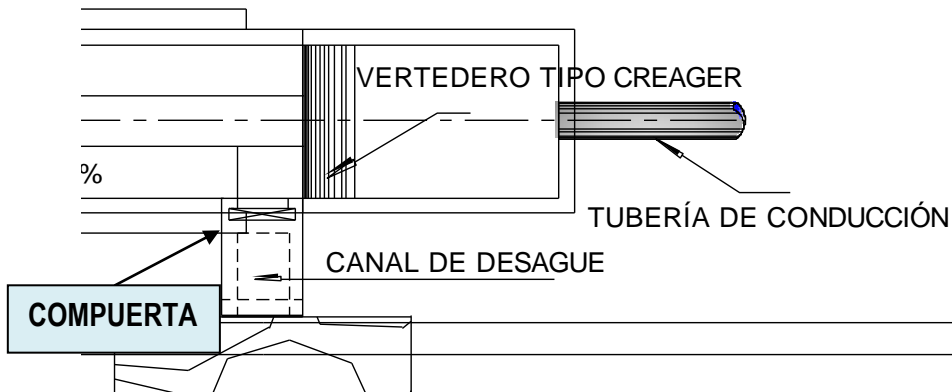


FIGURA 3.16. Vista en planta de la compuerta del desarenador (Elaborado por Herrera Diego)

$$Q = C * a * b * (2g)^{0.5} * (H - e * a)^{0.5}$$

		Coefficiente para calculo de	
C =	0.95	compuertas (0.95-0.97)	
a =	0.5	abertura de compuerta =	altura
b =	0.5	ancho de compuerta	
H =	2.508	carga de agua frente a la compuerta (m)	
a/H =	0.199362041		

⁶ Fuente: Diseño Hidráulico Sviatoslav Krochin. Tercera Edición, Octubre 2010, Pag 386-387, ecuación N.- 12-2

e =	0.62 (tabla)	Espesor de la compuerta
C =	0.95	
Q =	1.558854187 >	1.5

FUENTE: Gobierno de la provincia de Pichincha, Diseños Hidráulicos Definitivos, Anexo Toma caucasiana, Compuerta.

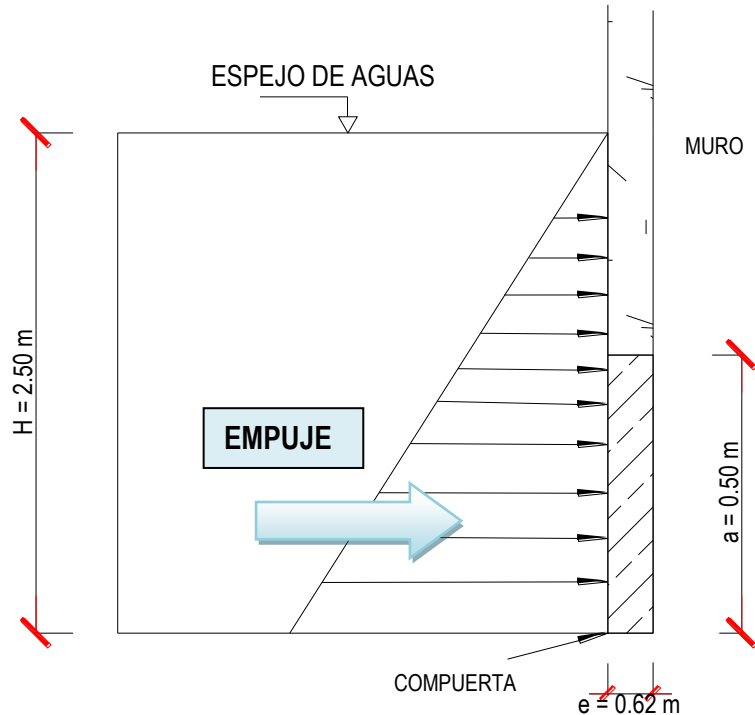


FIGURA 3.17. Corte transversal de la compuerta del desarenador (Elaborado por Herrera Diego)

3.1.5.1.- CAMBIO DE PENDIENTE DEL DESARENADOR

	$L_t = 1,2 * (V_d/w) * h$		
	$V_d =$	0.216	m/s
	$w = 4,32 \text{ cm/s} =$	0.0432	m/s
$h =$	2.31	m	
	$L_t =$	13.86	m
	$b =$	3.00	m
	$a =$	1.5	m

CANAL DE LAVADO DEL DESARENADOR

$V \geq 3 \text{ m/s}$		
$Q_{\text{diseño lav}} = 1,5 * Q$	2.25	m ³ /s
$A_l = Q / V$	0.75	m ²
a	1.5	m
t	0.5	m
$h_l = (A_l + ((b-a)/2) * t) / b$	0.38	m
$A = ((b+a)/2) * V =$	0.486	m ²
$\text{Tan } \alpha =$	0.67	
$\alpha = \text{ATAN}(1,00)$	33.82	
$P_l = a + 2 * (t / \text{Sen } \alpha) =$	3.30	m
$R = A_l / P_l =$	0.228	
$n =$	0.018	

$$C = 1/nR^{1/6} \quad 43.41$$

$$i_c = (Q/(A*C*R^{1/2}))^2 \quad 0.0222319 \quad 2.22232$$

$$i \text{ adoptado} = 3\%$$

$$Q = A*C*(R*i)^{1/2} \quad 2.69 \quad \text{aprox} = 2Q \quad \text{ok}$$

Donde:

V = velocidad mínima del canal desarenador.

Q dis lav = caudal de diseño de lavado del

desarenador = 1.5 * Q diseño

Al = área de lavado del canal desarenador.

a = base menor de la sección del canal (trapezoidal).

t = altura de la sección trapezoidal.

hl = altura de lavado de la sección trapezoidal.

A = área de la sección.

Pl = perímetro de lavado de la sección trapezoidal.

R = radio hidráulico de la sección.

n = coeficiente de rugosidad del hormigón.

C = coeficiente C.

i = pendiente del canal

Q = caudal de la sección

FUENTE: Gobierno de la provincia de Pichincha, Diseños Hidráulicos Definitivos, Anexo Toma caucásiana, Desarenador.

3.1.6.- AZUD

El azud se lo diseña con la ecuación general para un vertedero que esta expresada en función del coeficiente $C=2.2$, del caudal $Q=1.5\text{m}^3/\text{s}$ y de la longitud del mismo, entonces se obtiene el valor de $H_o = 0.346$.

A continuación se detalla el cálculo del Azud.

$$Q = C L H_e^{3/2}$$

$$Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L = 3.75 \text{ m} \quad \text{longitud del vertedero}$$

$$P = 0.3 \text{ m} \quad \text{altura del vertedero}$$

$$M = 2.2 \text{ adoptado al inicio}$$

$$H_d = H_e = 0.321 \text{ m}$$

$$(H_d / P)^{0.99} = 1.07$$

$$C_d = 2.16$$

$$H_e = H_d = 0.325 \text{ correcto}$$

$$C_d = 2.11 \text{ correcto}$$

$$P/H_d = 0.92 > \quad H_e / 5 = 0.07 \quad (\text{por norma})$$

$$V_a = 0.64 \text{ m/s} \quad \text{velocidad de aproximación}$$

$$h_a = V_a^2 / 2g = 0.021 \text{ m}$$

$$H_o = H_d + h_a = 0.346 \text{ m}$$

Las coordenadas del perfil del vertedero se calculan con el principio de perfil Creager.

PERFIL DEL VERTEDERO

$$Y / H_o = - K (x/H_o)^n$$

He/Ho = 0.940 (La forma ideal de la lámina vertiente es cuando He/Ho = 1)

ha / Ho = 0.060

Ver valores de K y n En Small Dams

K = 0.509

n = 1.845

$$Y / 0,319 = - 0,509 (X / 0,319)^{1,845}$$

1/n = 0.54

Ho * K = 0.176

$$X = 0,319 * (Y / 0,163)^{0,54}$$

P/Ho = 0.87

Con He/Ho ver la relación de C/Co

Co = coeficiente para taludes inclinados

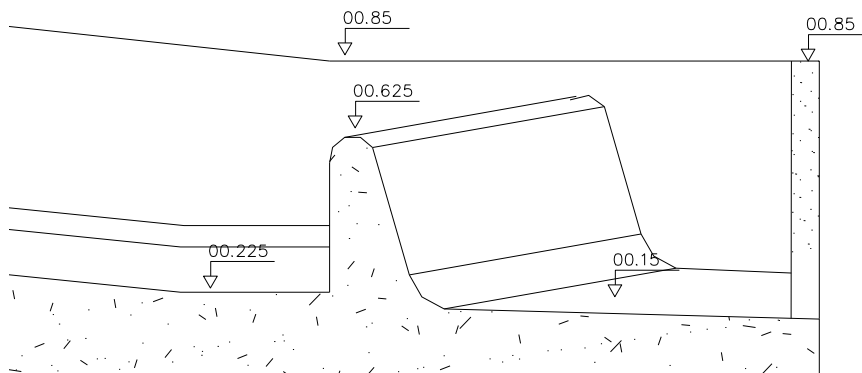


FIGURA 3.18. Corte transversal vertedero tipo creager (Elaborado por Herrera Diego)

Y (m)	X (m)
0.30	0.09
0.60	0.33
1.00	0.86
1.50	1.82
2.00	3.10
2.50	4.68
3.00	6.56
4.00	11.17
5.00	16.88

TABLA N° 3.8. Coordenadas del perfil Creager.

FUENTE: Gobierno de la provincia de Pichincha, diseños hidráulicos definitivos, anexo toma caucasiana, cimacio sin control.

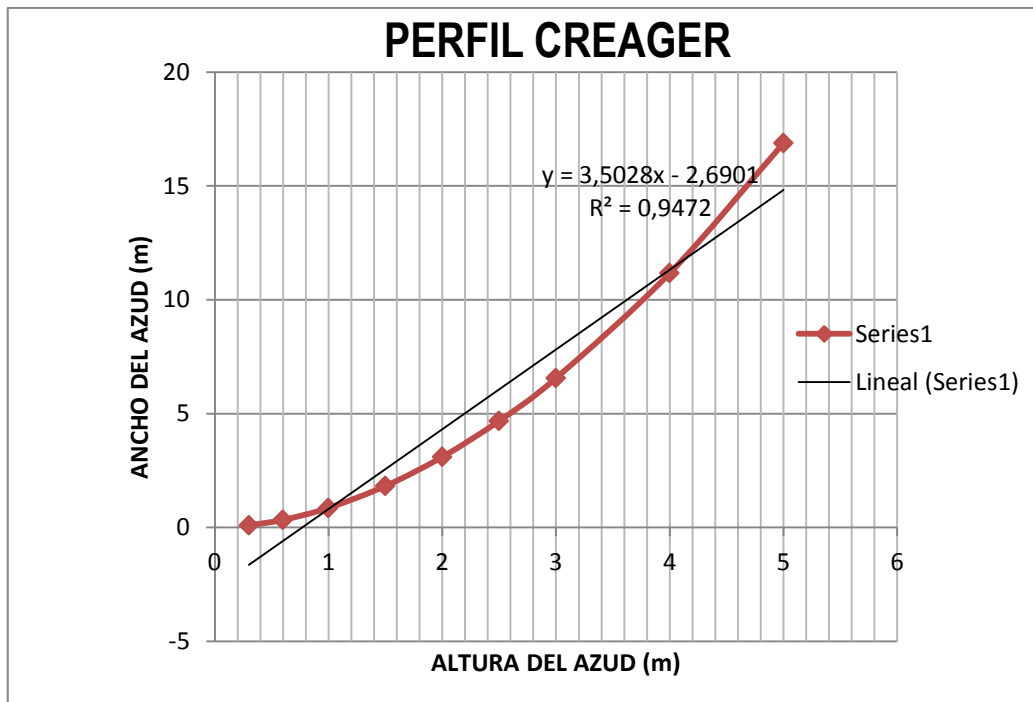


FIGURA 3.19. Perfil Creager (Elaborado por Herrera Diego)

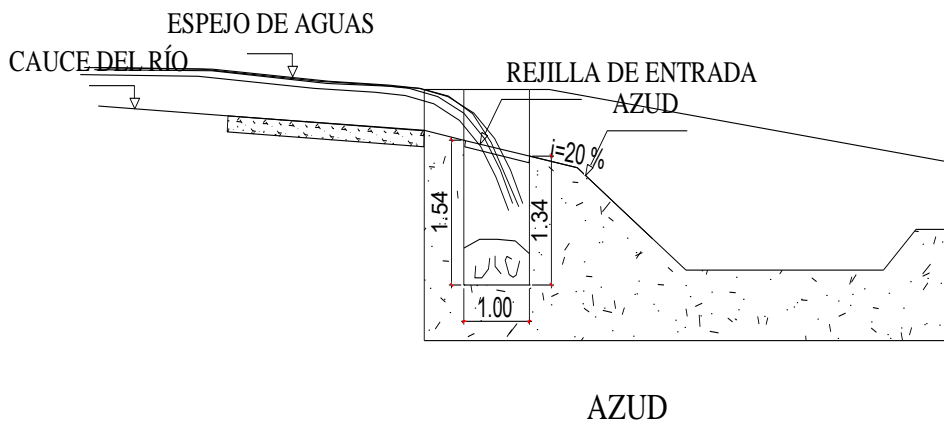


FIGURA 3.20. Azud (Elaborado por Herrera Diego)

3.1.7.- ZAMPEADO

El zampeado está diseñado como un colchón reno que se lo utiliza generalmente para la protección de la socavación del cauce, tomado como elemento drenante y siendo de muy bajo espesor. Consiste en formar una estructura monolítica de rocas en este caso el espesor del colchón $e = 0.3\text{m}$ y el de las rocas será de 12 a 18 cm.

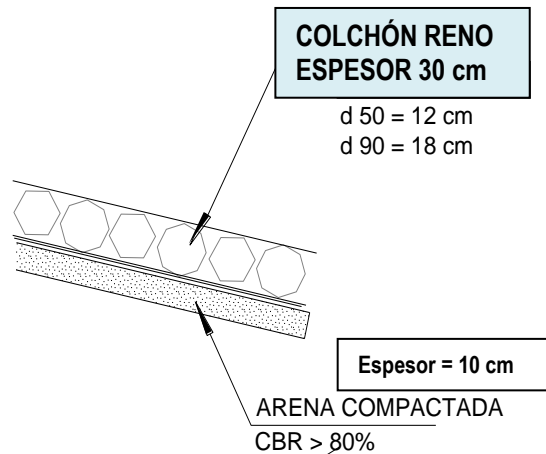


FIGURA 3.21. Zamepado (Elaborado por Herrera Diego)

3.2.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

La obra de toma estará implantada en la cota 3487.60 y ocupará toda la sección transversal del río Arturo sus dimensiones son aproximadamente 16m de ancho x 30m de largo.

El caudal de diseño de la toma es $Q_{\text{diseño}}=1.5m^3/s$, al ser el $Q_{\text{medio}}=0.39 m^3/s$ todo el agua del río ingresara a la toma, por lo que la fuente no tendrá el caudal ecológico.

La forma de los barrotes en el prototipo al ser circular es más propensa a que se produzcan taponamientos en la rejilla, lo que constituye un problema ya que el agua no ingresará a la misma y se requerirá de un mantenimiento más periódico de la toma.

La rejilla está dimensionada con una longitud $L=1.00m$ y ancho $B=3.75m$ y estará colocada en toda la longitud del azud, en la cota 3488.

El flujo en la galería de recolección cumple con la condición de ser flujo subcrítico ya que el número de Froude <1 , se tiene que $Fr = 0.79$.

El canal de transición entre la galería y el desarenador constituye una ampliación de 1m a 3m que es el ancho de la cámara desarenadora, la pendiente del desarenador es $i=3\%$ en una longitud de 13.89m, con lo que se espera que por la

disminución de velocidad las partículas caigan al fondo y se acumulen para posteriormente ser evacuadas.

Todas las ecuaciones aquí consideradas son conservadoras y se las ha elegido por su facilidad de cálculo, aunque no por ello se alejen mucho de los valores obtenidos con otras ecuaciones más complejas, ya sean para las pérdidas por rejilla, vertederos, etc.

Recordemos que la hidráulica es una ciencia experimental y todas las ecuaciones son aproximaciones a los valores obtenidos de modelos examinados en laboratorio y los resultados obtenidos dependen de las consideraciones externas consideradas.

3.3.- PLANOS Y DETALLES

Los planos y detalles de la toma, proporcionados por el Gobierno provincial de Pichincha, constan en el anexo 3.3.

Capítulo IV

DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO

4.1.- OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA MODELACIÓN FÍSICA

OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN FÍSICA

Al constituir los modelos hidráulicos físicos, una herramienta muy poderosa que se tiene para conocer, comprender y explicar el comportamiento del agua en la naturaleza y los efectos que tienen en las obras hidráulicas, aquí analizaremos un sistema de una toma de fondo de un río de montaña, el funcionamiento del desarenador y la influencia que tiene el diseño de la rejilla en la captación del agua y la obstrucción de la misma con sedimentos gruesos.

ALCANCE DE LA MODELACIÓN FÍSICA

Los fenómenos hidráulicos que ocurren en la naturaleza, al ser muy complejos no es posible analizarlos y describirlos en su totalidad. Sólo se puede hacerlo parcialmente.

“Modelo es toda esquematización de la realidad hecha con fines de estudio. Todas las ciencias de los objetos reales trabajan con situaciones idealizadas que constituyen inevitablemente simplificaciones (deformaciones de la realidad) “⁽⁷⁾, es decir modelo es una representación a escala que nos permite establecer una secuencia para realizar una investigación sobre las variables que intervienen en un sistema.

La investigación en modelo hidráulico se basa en la teoría de la semejanza hidráulica, consiste fundamentalmente en establecer leyes o relaciones funcionales mediante similitud geométrica (lados, superficies y volúmenes), cinemática (movimiento, velocidad), y dinámica (fuerzas actuantes sobre el flujo), que conjuntamente relacionan las magnitudes físicas homologas definidas entre el prototipo y el modelo.

⁷ Fuente: Rocha Arturo, Los modelos como herramienta para el diseño hidráulico Pág. 3.

El requerimiento básico de la modelación hidráulica consiste en reproducir fielmente el comportamiento del sistema del prototipo, una vez que se ha realizado la adecuada identificación de los principales parámetros que influyen en el fenómeno en investigación para así obtener como resultados patrones de flujo, niveles de agua, caudales, etc., que posteriormente serán útiles para el diseño de la obra o también en las condiciones de operación de la misma.

Aquí se realizará el estudio de resultados en base a la modificación del desarenador y rejilla de fondo del modelo físico hidráulico reducido de la toma de fondo que capta aguas del río Arturo, dicha toma forma parte del proyecto de riego Cayambe - Tabacundo, está ubicada en el cantón Cayambe, provincia de Pichincha. Esta investigación está principalmente direccionada a la búsqueda de resultados como parámetros de rediseño que la obra puede requerir hacia un futuro, así como el aumento de la captación de sedimentos en el desarenador debido a la disminución de la pendiente en el canal de sedimentación y el cambio en el diseño de los barrotes de la rejilla de fondo.

La modificación del modelo reducido está basado en varios factores: económico, de tiempo, de construcción, ensayos, etc; pero nos lleva a una mejora en la captación de la obra real, así como a la corrección de errores que posteriormente hubieran obligado a la futura construcción de obras de reparación del sistema, así como la construcción de una estructura en el canal del desarenador hacia la salida del canal de transición y obtener mayor seguridad en el diseño.

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

4.2.- RESTRICCIONES PARA EL USO DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA

La modelación numérica también conocida como la modelación matemática está definida por una serie de ecuaciones que representan de una forma simplificada el comportamiento del sistema en análisis.

En la modelación numérica es una parte fundamental la descripción del fenómeno, planteándose las variables que intervienen y las hipótesis del comportamiento de la misma, el planteamiento de las ecuaciones que describen matemáticamente el fenómeno (modelo matemático), las condiciones de frontera y la variabilidad de solución y la selección del método de solución del modelo matemático, es decir la elección del algoritmo de cálculo.

Una de las dificultades que presenta la modelación matemática, es la idealización de los fenómenos, en la cual se realizan simplificaciones importantes; éstas sólo pueden ser valoradas por medio de pruebas experimentales aplicadas a modelos físicos a escala.

Por ser este un estudio a realizarse en un modelo hidráulico físico de un prototipo existente, queda limitada la realización de la modelación numérica ya que los resultados serán obtenidos en el laboratorio y además se tratará de optimizar la capacidad de captación en la toma de fondo.

4.3.- ANÁLISIS DIMENSIONAL

En el planteamiento del análisis de los fenómenos hidráulicos a ser simulados se puede identificar un conjunto de magnitudes o variables que intervienen en él, para encontrar las relaciones entre las variables es necesario realizar el análisis dimensional de dichas magnitudes para llegar así a una ecuación que sea dimensionalmente homogénea.

Al ser el análisis dimensional una potente herramienta que permite simplificar el estudio de fenómenos hidráulicos en el que estén involucradas muchas magnitudes físicas en forma de variables independientes. Su resultado fundamental, el teorema de Vaschy-Buckingham (más conocido por teorema Π II) permite cambiar el conjunto original de parámetros de entrada dimensionales de un problema físico por otro conjunto de parámetros de entrada adimensionales más reducido. Estos parámetros adimensionales se obtienen mediante combinaciones adecuadas de los parámetros dimensionales y no son únicos, aunque sí lo es el número mínimo necesario para estudiar cada sistema. De este modo, al obtener uno de estos conjuntos de tamaño mínimo se consigue analizar con mayor facilidad el sistema objeto de estudio, reducir drásticamente el número de ensayos que debe realizarse para averiguar el comportamiento o respuesta del sistema.

El análisis dimensional es la base de los modelos a escala reducida ya que a partir de dichos ensayos se obtiene información sobre lo que ocurre en el fenómeno a escala real cuando existe semejanza física entre el prototipo y el modelo a escala, gracias a que los resultados obtenidos en el modelo a escala son válidos para el prototipo, si los números adimensionales que se toman como variables independientes para la experimentación tienen el mismo valor en el modelo y en el prototipo. Así, para este tipo de cálculos, se utilizan ecuaciones dimensionales, que son expresiones algebraicas que tienen como variables a las unidades fundamentales y derivadas, las cuales se usan para demostrar fórmulas, equivalencias o para dar unidades a una respuesta.

4.3.1.- MAGNITUDES FÍSICAS

Todos los objetos están compuestos por la materia física que los forman, existen en un determinado tiempo y ocupan un lugar en el espacio que nos rodea, es por esta observación que se ha podido identificar las magnitudes físicas masa (M), longitud (L) y tiempo (T).

“El enlace físico de las magnitudes da lugar a las leyes físicas, expresadas por ecuaciones homogéneas. Las leyes físicas pueden ser simples o complejas y pueden definir a la magnitud derivada o dependiente”.⁽⁸⁾, es por esto que las magnitudes físicas pueden ser básicas y secundarias. Las básicas o también llamadas fundamentales son la longitud (L), masa (M) y tiempo (T) estas se definen por si mismas por lo que no necesitan de una ecuación y constituyen una propiedad básica de todos los objetos y las secundarias o derivadas que son cualquiera que esté en función de las básicas como pueden ser, área (A), Volumen (V), velocidad (v), gastos o caudales (Q), fuerza (F), etc.

Para establecer una ecuación que represente un fenómeno físico y por ende una magnitud dimensionalmente homogénea debe la dimensión de cada uno de sus componentes ser igual y por tanto válido para cualquier sistema de unidades, es decir que las magnitudes deben ser independientes del sistema de unidades utilizado.

4.3.2.- MAGNITUDES GEOMÉTRICAS

Se refieren a la geometría física de las estructuras hidráulicas así como el dominio en el que se verifica el fenómeno puede ser definido de tres magnitudes genéricas a, b, c que representan la longitud, el ancho y la profundidad y cuyo dimensional es (L).

Es importante remarcar que además de estas magnitudes físicas geométricas, en el fenómeno hidráulico pueden identificarse adicionalmente una magnitud geométrica propia del fenómeno hidráulico, que en la mayoría de los casos puede ser el radio hidráulico que también se la define como la longitud característica (d).

4.3.3.- MAGNITUDES CINEMÁTICAS

En el campo físico donde se verifica el fenómeno hidráulico está identificado por sus características cinemáticas, sea a través de la red de flujo o de las trayectorias

⁸ Fuente: Introducción a la teoría de Modelos Hidráulicos y aplicaciones básicas Ing. Marcelo Hidalgo.

de las partículas fluidas ⁽⁵⁾, que están por su vector velocidad (v) al mismo que le corresponde su dimensional (LT⁻¹).

En la práctica es común que la velocidad (v) sea sustituida por el caudal (Q) como parámetro cinemático, al mismo que le corresponde su dimensional (L³T⁻¹)

De igual manera magnitudes cinemáticas alternas a la velocidad en algunos casos puede ser considerada la aceleración, la gravedad (9.80 m/s²) y la velocidad angular.

4.3.4.- MAGNITUDES DINÁMICAS

El fenómeno hidráulico se caracteriza por las fuerzas que intervienen, controlando su movimiento y definiendo su estado inercial ⁽⁹⁾, esto se explica que en estos fenómenos es válida la ecuación de Newton de la dinámica.

$$F_i = \Sigma F_j$$

Las fuerzas que se identifican en la mayoría de los fenómenos hidráulicos y por ende su acción y el comportamiento del modelo son:

FUERZAS INTERNAS (PRESION)

Las fuerzas internas permiten definir el estado interno de las tensiones que actúan sobre cada una de las partículas del flujo en movimiento, generalmente se la representa por la reacción del promedio aritmético de los esfuerzos normales (σ_u en número de 3 en sistema cartesiano) definido por la presión (P) o por la diferencia de presión entre los puntos ΔP . Por tanto:

$$F_p = \Delta P * A$$

Y de dónde cuyo dimensional de P es (FL⁻²)

FUERZAS EXTERNAS (GRAVEDAD)

Son las fuerzas gravitacionales que permiten definir el estado de las tensiones que actúan en el centro de gravedad de las partículas elementales de la masa fluida en movimiento, o en su defecto en un dominio o simplemente un volumen de control,

⁹ Fuente: Introducción a la teoría de Modelos Hidráulicos y aplicaciones básicas Ing. Marcelo Hidalgo.

cuya magnitud representativa es el peso específico cuyo dimensional es (FL^{-3}), y se expresa de la siguiente forma:

$$Fg = M * g , o$$

$$Fg = \rho * L^3 * g$$

FUERZAS ELÁSTICAS

La compresibilidad representa la relación entre los cambios de volumen y los cambios de presión a que está sometido un fluido. Las variaciones de volumen pueden relacionarse directamente con variaciones de la masa específica si la cantidad de masa permanece constante. En general se sabe que en los fluidos la masa específica depende tanto de la presión como de la temperatura de acuerdo a la ecuación de estado.

Las fuerzas elásticas definen el carácter comprensible o incomprensible de los fluidos y por tanto se expresa por:

$$F_E = \frac{L^2 * E}{K}$$

Y la magnitud representativa es el módulo de elasticidad volumétrico (E) y cuyo dimensional es (FL^{-2})

FUERZAS VISCOSAS

La viscosidad es una propiedad de los fluidos, que está ligada a la resistencia que opone un fluido a deformarse continuamente cuando se le somete a un esfuerzo de corte. Esta propiedad es utilizada para distinguir el comportamiento entre fluidos y sólidos. Además los fluidos pueden ser en general clasificados de acuerdo a la relación que exista entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación.

La magnitud representativa es la viscosidad dinámica (μ) y su dimensional es ($FL^{-2}T$) y se la expresa:

$$F_u = \mu * \frac{dv}{dy} * L^2$$

FUERZAS DE TENSION SUPERFICIAL

Se ha observado que entre la interfase de dos fluidos que no se mezclan se comportan como si fuera una membrana tensa. La tensión superficial es la fuerza que se requiere para mantener en equilibrio una longitud unitaria de esta película. El valor de ella dependerá de los fluidos en contacto y de la temperatura. Los efectos de la tensión superficial solo son apreciables en fenómenos de pequeñas dimensiones, como es el caso de tubos capilares, burbujas, gotas y situaciones similares. Cabe señalar que en los modelos hidráulicos por ser representaciones reducidas su efecto será mayor; su magnitud representativa es la tensión superficial (σ) y sus dimensionales son (FL^{-1}) y se expresa por:

$$F_\sigma = \sigma * L$$

FUERZAS DE INERCIA

Son aquellas que definen el sistema inercial de un fluido interviniendo en el movimiento del mismo, por lo que se la define como la densidad del fluido $F_i = (\rho)$ y su dimensional es ($FL^{-4}T^{-2}$).

4.4.- SIMILITUD DINÁMICA EXACTA Y RESTRINGIDA

La utilización de un modelo hidráulico involucra que este debe ser semejante al prototipo, es decir que sus movimientos de flujo deben tener comportamientos similares, para lo cual debe satisfacerse ciertas leyes que relacionan magnitudes físicas homologas definidas entre ambos sistemas, esto se puede obtener al cumplirse la similitud geométrica, similitud cinemática y similitud dinámica.

- **Similitud geométrica** se cumple cuando las magnitudes geométricas que condicionan el fenómeno hidráulico en estudio, tienen la misma relación de escala, es decir:

Para cualquier longitud L

$$L = \frac{L_p}{L_m} = E_L$$

De donde

E_L = Escala de longitudes,

L_p = Longitud de prototipo, y

L_m = Longitud de modelo

- **Similitud cinemática** se la obtiene cuando, al comparar el prototipo y el modelo, los patrones de flujo homólogos con respecto a un movimiento son iguales en cualquier tiempo, esto quiere decir que la relación de velocidades es constante y la escala de velocidades también lo es, debe cumplirse la similitud geométrica para que se cumpla la similitud cinemática, por lo tanto se tiene que:

$$V_e = \frac{V_p}{V_m}$$

$$T_e = \frac{T_p}{T_m}$$

$$a_e = \frac{a_p}{a_m}$$

Donde:

V_e = escala de velocidades,

T_e = escala de tiempos, y

a_e = escala de aceleraciones

Al tomar mediciones de velocidades, tiempos y aceleraciones en cualquier punto del modelo y multiplicarlas por la correspondiente escala se puede obtener valores de velocidades, tiempos y aceleraciones en puntos homólogos del prototipo.

- **Similitud dinámica** entre el modelo y el prototipo existe cuando el conjunto de fuerzas que actúan en el fluido, en puntos homólogos, se relacionan entre sí en magnitud, mediante un valor único y constante, F_e (Escala de fuerzas).

Se dice que dos sistemas tendrán una completa similitud cuando se presenten simultáneamente las similitudes geométrica, cinemática y dinámica.

Las fuerzas que comúnmente intervienen en el flujo son la de inercia, presión, gravedad, viscosidad, tensión superficial y elásticas, mencionadas anteriormente.

Si la sumatoria de estas fuerzas no es igual a cero se producirá una aceleración en las partículas, es por razones de equilibrio entonces que la sumatoria de fuerzas será igual a cero, teniendo que:

$$F_p + F_g + F_E + F_\mu + F_\sigma + F_i = 0$$

La semejanza dinámica implica que se cumpla:

$$F_e = \frac{F_{pp}}{F_{pm}} = \frac{F_{gp}}{F_{gm}} = \frac{F_{Ep}}{F_{Em}} = \frac{F_{\mu p}}{F_{\mu m}} = \frac{F_{\sigma p}}{F_{\sigma m}} = \frac{F_{ip}}{F_{im}}$$

La relación de cada una de estas fuerzas con la inercia dan lugar a parámetros adimensionales que generalmente reciben el nombre de los investigadores que los utilizaron por primera vez, a continuación se mencionarán los parámetros más utilizados en la modelación hidráulica, que también se los conoce como números.

♦ **Numero de Reynolds:** Su nombre se debe al Ingeniero británico Osborne Reynolds (1842-1912) que se especializó en particular en el estudio de los fluidos viscosos. Al estudiar la transición entre el flujo laminar y el turbulento a través de un tubo determinó que:

$$Re = \frac{V * L}{\gamma} = \frac{\delta * V * L}{\mu}$$

Donde:

L = longitud del campo del flujo y

γ = Viscosidad cinemática

Si la ecuación anterior se la expresa de la siguiente manera se tiene que:

$$Re = \frac{\delta * V * L}{\mu} = \frac{\delta * V * L}{\mu} \times \frac{V}{V} \times \frac{L}{L} \times \frac{1}{L/L} = \frac{\delta * V^2 * L^2}{(\mu * V/L) * L^2}$$

Se tiene que:

$$\delta * V^2 * L^2 \approx \textit{Presion dinamica} * \textit{Area} \approx \textit{Fuerza de inercia}$$

$$(\mu * V * L^2)/L \approx \textit{Esfuerzo Viscoso} * \textit{Area} \approx \textit{Fuerza de Viscosa}$$

Entonces el número de Reynolds es el cociente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas.

$$Re = \frac{\textit{Fuerzas Inerciales}}{\textit{Fuerzas Viscosas}}$$

Para aplicar la condición de Reynolds entre el modelo y el prototipo en un fenómeno hidráulico, la viscosidad del fluido debe gobernar en la configuración dinámica de flujo entonces es inevitable el cumplimiento que obliga a que los números de Reynolds en prototipo y en modelo sean iguales por lo que se deberá cumplir:

$$Re = \frac{V_p * L_p}{\gamma_p} = \frac{V_m * L_m}{\gamma_m}$$

Esta condición será aplicada en modelos donde se estudien la sustentación y el empuje de estructuras sumergidas en un flujo.

♦ **Numero de Froude:** Su nombre se debe al Ingeniero británico William Froude (1810-1879), quien estableció que el número de Froude (Fr) es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y la fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido.

Siendo el número de Froude:

$$Fr = \frac{V}{(g * L)^{1/2}}$$

Siendo este parámetro muy significativo para los flujos que están representados por superficie libre.

Al elevar al cuadrado este parámetro se obtiene que:

$$Fr^2 = \frac{V^2}{g * L} = \frac{\delta}{\delta} * \frac{V^2}{g * L} * \frac{L^2}{L^2} = \frac{\delta * V^2 * L^2}{\delta * g * L^3}$$

$$\delta * V^2 * L^2 \approx \text{Presion dinamica} * \text{Area} \approx \text{Fuerza de inercia}$$

$$\delta * g * L^3 \approx \text{Peso especifico} * \text{Area} \approx \text{Fuerza de peso}$$

Entonces el número de Froude es el cociente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales.

$$Fr = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Gravitacionales}}$$

♦ **Número de Mach:** Su nombre se debe al Físico y Filósofo Austriaco Ernst Mach (1838-1916), quien dedico su estudio principalmente a la física de fluidos a velocidades superiores a la del sonido, y determino el número de Mach como un parámetro de compresibilidad que se lo define como el cociente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas elásticas, relacionando la velocidad característica del fluido con la velocidad del sonido es decir con la celeridad con que se transmiten las ondas del fluido en el sonido.

$$Ma = \frac{V}{(Ev * \delta)^{1/2}} = \frac{V}{c} = \left(\frac{\delta * V^2}{\delta * c^2} \right)^{1/2}$$

Donde:

Ev= módulo de elasticidad del fluido

$$Ma = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Elásticas}}$$

Cuando el número de Mach es menor al 40% ($Ma \leq 0.40$) el flujo se lo considera como incomprensible y las fuerzas elásticas no pueden ser consideradas.

Al ser un parámetro en el que interviene ondas del flujo del sonido no tiene mucha aplicabilidad en la modelación hidráulica, sino más bien se lo utiliza en la aerodinámica donde se trabaja con velocidades supersónicas.

♦ **Número de Euler:** Su nombre se debe al Matemático y Físico Suizo Filósofo Austriaco Ernst Mach (1707-1783), este parámetro se establece para los fenómenos hidráulicos en los que predominan la fuerza de presión (fuerzas internas), es decir donde el movimiento dependerá de la forma del flujo, donde las líneas de corriente estarán prácticamente invariables.

Este parámetro se lo expresa como la relación entre las fuerzas cinemáticas y las de presión.

$$Eu = \frac{\delta * V^2}{\Delta p} = \frac{V^2}{g * h} = \frac{Fuerzas \text{ Cinemáticas}}{Fuerzas \text{ Presión}}$$

Es mayormente utilizado en el movimiento que presenta flujo a presión es decir donde con una configuración invariable de las líneas de corriente el movimiento depende de la forma del flujo.

♦ **Número de Weber:** Su nombre se debe al Investigador Alemán Moritz Weber (1871-1951), quien realizó estudios para la determinación de la tensión superficial en el flujo. Este parámetro se emplea generalmente en los flujos con fuertes cambios de dirección, se lo puede definir como la relación entre las fuerzas de inercia y la tensión superficial, por lo que queda expresado de la siguiente manera:

$$W = \frac{\delta * V^2 * L}{\sigma} = \frac{Fuerzas \text{ Inerciales}}{Fuerzas \text{ de Tensión Superficial}}$$

Los efectos de la tensión superficial en las estructuras hidráulicas es bastante reducida por lo que generalmente no es tomada en cuenta, pero en la modelación hidráulica al tratarse de sistemas reducidos esta se puede ver mayorada es por esto que se debe observar los efectos de escala para su corrección.

Generalmente en un fenómeno hidráulico en particular, dada la complejidad de representar todas las fuerzas que intervienen en el mismo, algunas de estas pueden ser despreciadas por lo que una fuerza será predominante y se puede alcanzar un cierto grado de precisión, del análisis de las similitudes particulares se puede concluir que en los fenómenos con superficie libre la fuerza predominante es la fuerza de gravedad, indiscutiblemente a más de la inercial.

Los efectos del número de Reynolds y del número de Weber para que puedan ser despreciados deben ser lo suficientemente grandes respecto a las fuerzas gravitacionales.

Para que se pueda despreciar los efectos de la viscosidad en el modelo, el número de Reynolds debe tener un valor muy elevado.

Por otra parte los efectos de la tensión superficial en modelos a superficie libre, se los puede eliminar cuando las profundidades o calados del agua en el modelo sean superiores a 3.00cm, pero en ningún caso cuando estos calados sean menores a 2.50cm.

Al tratarse del estudio de un modelo hidráulico de movimiento del agua a superficie libre se debe considerar la similitud particular de Froude, cabe indicar que para el estudio del presente proyecto en modelo hidráulico físico de una toma de fondo con su aplicación en la toma del río Arturo del proyecto canal de riego Tabacundo, el objetivo del estudio es proporcionar parámetros de diseño que la obra pueda requerir antes de su construcción, así como la optimización de la eficiencia de la toma, minimizando el ingreso del material sólido en la galería de captación mediante la variación del ángulo de inclinación de la rejilla por lo que no se profundizará en la simulación del transporte de sedimentos, sino más bien en la eficiencia de la toma como tal.

El modelo en estudio será entonces un modelo hidráulico de fondo fijo con la similitud de Froude. ⁽¹⁰⁾

Entonces es necesario analizar más profundamente los principios y condiciones teóricas de la similitud de Froude para un mejor conocimiento, realización y obtención de los objetivos planteados en este tipo de investigación.

¹⁰ Fuente: Estudio en el modelo hidráulico físico del flujo en una toma de fondo tipo caucasiana o tirolesa Narváez Mayra y Pérez Luis.

▪ **SIMILITUD PARTICULAR DE FROUDE**

Cuando el flujo en modelo y en prototipo están gobernados por las fuerzas de inercia y gravitacionales entonces será representado por la similitud particular de Froude.

Escala: es “la relación que existe entre una magnitud del prototipo y su correspondiente en modelo” ⁽¹¹⁾, se la representa con el símbolo de la variable en estudio, a la cual se añade el subíndice e y se la encuentra expresada por:

$$e = \frac{\text{magnitud prototipo}}{\text{magnitud modelo}} = \frac{e_p}{e_m}$$

La escala de fuerzas, partiendo de la ecuación básica, entre el prototipo y modelo será:

$$F = \gamma * V$$

$$e_f = \frac{F_p}{F_m} = \frac{\gamma_p * V_p}{\gamma_m * V_m} = e_T * e_L^3 \quad (4.1)$$

Como la escala de fuerzas debe cumplir con la segunda ley de Newton, entonces:

$$e_f = e_M * e_a$$

$$e_f = e_M * e_L * e_T^{-2} \quad (4.2)$$

Si igualamos las expresiones (4.1) y (4.2)

$$e_T * e_L^3 = e_M * e_L * e_T^{-2}$$

$$e_T * e_L^3 = e_M * e_v * e_T^{-1} \quad (4.3)$$

y como:

¹¹ Fuente: Modelos Hidráulicos Masa José Antonio, México, publicación N.- 169 de la U.N.A.M 1969.

$$e_T = \frac{\gamma_p}{\gamma_m} = \frac{\delta_p * g_p}{\delta_m * g_m} = e_\delta * e_g$$

$$e_T = e_\delta * e_g \quad (4.4)$$

Y

$$e_M = \frac{M_p}{M_m} = \frac{\delta_p * V_p}{\delta_m * V_m} = e_\delta * e_L^3$$

$$e_M = e_\delta * e_L^3 \quad (4.5)$$

Reemplazando la ecuación (4.4) y (4.5) en (4.3) obtendremos:

$$e_\delta * e_g * e_L^3 = e_\delta * e_L^3 * e_v * e_T^{-1}$$

$$e_g * e_L^3 = e_L^3 * e_v * e_T^{-1}$$

$$e_g * e_L^3 = e_L^2 * e_v^2$$

$$e_g * e_L = e_v^2$$

$$\frac{e_v^2}{e_g * e_L} = 1$$

$$\frac{e_v}{(e_g * e_L)^{1/2}} = 1 \quad (4.6)$$

Como:

$$e_{Fr} = \frac{Fr_p}{Fr_m} = \frac{(V/(g*L)^{1/2})_p}{(V/(g*L)^{1/2})_m} = \frac{e_v}{(e_g * e_L)^{1/2}} \quad (4.7)$$

Igualando (4.6) y (4.7) tenemos que:

La escala de la aceleración de la gravedad es 1 porque la gravedad será la misma tanto en el prototipo como en el modelo y entonces tenemos que:

$$\frac{e_v}{(e_g * e_L)^{1/2}} = 1 = e_a$$

$$\frac{e_v}{e_L^{1/2}} = 1$$

$$e_v = e_L^{1/2}$$

(4.8)

Siendo e_v la escala de velocidades

La escala de caudales viene dada por:

$$e_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{(V * A)_p}{(V * A)_m} = e_v * e_L^2 = e_L^{1/2} * e_L^2$$

$$e_Q = e_L^{5/2}$$

(4.9)

y para el tiempo tenemos que la escala es:

$$e_T = \frac{T_p}{T_m} = \frac{(L/V)_p}{(L/V)_m} = \frac{e_L}{e_v} = e_L * e_L^{-1/2}$$

$$e_T = e_L^{1/2}$$

(4.10)

La escala de fuerzas estará dada por:

$$e_F = \frac{F_p}{F_m} = \frac{\gamma_p * \forall_p}{\gamma_m * \forall_m} = \frac{(\delta * g * \forall)_p}{(\delta * g * \forall)_m} = e_\delta * e_g * e_L^3$$

Como se utilizara el mismo líquido en el prototipo y en el modelo entonces $e_\delta=1$:

$$e_F = e_L^3$$

(4.11)

la escala de potencias estará dada por:

$$e_N = \frac{N_p}{N_m} = \frac{(F * V)_p}{(F * V)_m} = \frac{(\gamma * \forall * V)_p}{(\gamma * \forall * V)_m}$$

$$e_N = \frac{(\gamma * \forall * Q / A)_p}{(\gamma * \forall * Q / A)_m} = \frac{(\gamma * H * Q)_p}{(\gamma * H * Q)_m}$$

$$e_N = e_L * e_Q$$

$$e_N = e_L * e_L^{5/2}$$

$$e_N = e_L^{7/2}$$

(4.12)

Escala de trabajo (energía):

$$e_E = \frac{E_p}{E_m} = \frac{(N * T)_p}{(N * T)_m} = e_N * e_T = e_L^{7/2} * e_L^{1/2}$$

$$e_E = e_L^4$$

(4.13)

Para la escala de rugosidad se supone que el modelo será de fondo fijo, sin distorsión y con rozamiento y entonces se parte de las siguientes expresiones:

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * I^{1/2} \quad (\text{Manning})$$

$$V = Km * R^{2/3} * I^{1/2} \quad (\text{Strickler})$$

De donde tenemos que:

n = coeficiente de rugosidad de Manning

Km = coeficiente de resistencia de Strickler, además se considera los siguientes coeficientes de resistencia al aplicar la formula a toda la sección:

K_w = coeficiente de resistencia debido a la rugosidad de las paredes

K_s = coeficiente de resistencia debido a la rugosidad del fondo

K_r = coeficiente de resistencia proveniente de la resistencia al flujo de las partículas constituyentes del fondo el mismo que para el caso de turbulencia (el cauce se comporta como rugoso) es igual a:

$$K_r = \frac{C}{d^{1/6}}$$

Donde:

c = coeficiente de Chezy, siendo $C=26m^{1/2}/s$ para $d=d_{90}$ y $C=21m^{1/2}/s$ para $d=d_{50}$ para material uniforme como no uniforme

d = diámetro característico de las partículas

R = radio hidráulico

I = pendiente o gradiente de energía

Dados los condicionantes impuestos se tiene que:

$$K_m = K_w = K_s = K_r$$

Igualando los condicionamientos de Manning y Strickler se tiene que:

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * I^{1/2} = K_r * R^{2/3} * I^{1/2}$$

$$e_V = \frac{V_p}{V_m} = \frac{K_{r_p}}{K_{r_m}} * \frac{R_p^{2/3}}{R_m^{2/3}} * \frac{I_p^{1/2}}{I_m^{1/2}}$$

El gradiente de energía del prototipo y el modelo deben ser iguales con lo que:

$$\frac{I_p^{1/2}}{I_m^{1/2}} = 1$$

entonces:

$$e_V = \frac{Kr_p}{Kr_m} * e_L^{2/3}$$

y si asumimos d_{50} , tenemos que:

$$Kr_p = \frac{21}{d_{50p}^{1/6}}$$

$$Kr_m = \frac{21}{d_{50m}^{1/6}}$$

$$e_K = \frac{Kr_p}{Kr_m} = \left(\frac{d_{50p}}{d_{50m}}\right)^{1/6} = \frac{1}{e_L^{1/6}}$$

$$K = \frac{1}{n}$$

$$e_K = \frac{1}{e_n}$$

$$e_n = e_L^{1/6} \quad (4.14)$$

si reemplazamos esta última ecuación a continuación se tendrá que:

$$e_V = \frac{n_m}{n_m} * \frac{R_p^{2/3}}{R_m^{2/3}} * \frac{I_p^{1/2}}{I_m^{1/2}} = \frac{1}{e_n} * e_L^{2/3}$$

$$e_V = \frac{1}{e_L^{1/6}} * e_L^{2/3}$$

$$e_V = e_L^{1/2}$$

Es decir, que, obtenemos la similitud de Froude.

Las magnitudes geométricas, cinemáticas y dinámicas para cuando se aplica la similitud de Froude, se presentan en la Tabla N° 4.1

TABLA N° 4.1. Magnitudes físicas para el método de Froude

MAGNITUDES GEOMÉTRICAS

Longitud	$L_p = L_m (e_L)$
Área	$A_p = A_m (e_L)^2$
Volumen	$\gamma_p = \gamma_m (e_L)^3$
Rugosidad	$n_p = n_m (e_L)^{1/6}$

MAGNITUDES CINEMÁTICAS

Tiempo	$T_p = T_m (e_L)^{1/2}$
Velocidad	$V_p = V_m (e_L)^{1/2}$
Caudal	$Q_p = Q_m (e_L)^{5/2}$
Aceleración	$a_p = a_m$

MAGNITUDES DINÁMICAS

Numero de Reynolds	$Re_p = Re_m (e_L)^{3/2}$
Masa	$M_p = M_m (e_L)^3$
Fuerza	$F_p = F_m (e_L)^3$
Energía	$E_p = E_m (e_L)^4$
Potencia	$N_p = N_m (e_L)^{7/2}$

ELABORADO POR: Herrera Diego.

Además la densidad y la gravedad en el modelo y en el prototipo serán las mismas por lo que a relación entre estas será 1.

En los modelos hidráulicos que se presentan bajo la condición de similitud de Froude, las fuerzas preponderantes son las de gravedad, pero sin embargo, la viscosidad nunca desaparece, si se trata de conseguir la ley de similitud que estén presentes los dos efectos (viscosidad y gravedad), deben cumplirse que las escalas de tiempo de Froude y de Reynolds sean iguales. Igualando estas escalas se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\mu_p}{\mu_m} = e_L^{3/2}$$

Si se realiza la investigación con el mismo liquido (agua) en el prototipo y en el modelo la escala de longitud es uno, es decir que el único modelo exactamente igual al prototipo, es el prototipo mismo.

4.5.- SELECCIÓN DE LA ESCALA

Se tomó la misma escala del modelo construido 1:04, pues se trabajó con el mismo modelo implantado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, ya que es la que prestó las mejores condiciones con las que se obtuvo una escala geométrica y de caudales trabajable para obtener mejores resultados.

TABLA N° 4.2. Valores de parámetros según distintas escalas para el modelo hidráulico

DIMENSIONES	PROTOTIPO	MODELO				
		ESC 1:02	ESC 1:03	ESC 1:04	ESC 1:05	ESC 1:10
		2	3	4	5	10
LONGITUD MÁXIMA	m	M	m	m	m	m
Largo	30.00	15.00	10.00	7.50	6.00	3.00
Ancho	16.00	8.00	5.33	4.00	3.20	1.60
VELOCIDAD	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
Aproximación	0.59	0.42	0.34	0.30	0.26	0.19
CAUDAL	m ³ /s	lts/s	lts/s	lts/s	lts/s	lts/s
Máximo	1.73	305.82	110.98	54.06	30.95	5.47
Medio	0.39	68.94	25.02	12.19	6.98	1.23
Mínimo	0.09	15.91	5.77	2.81	1.61	0.28
Diseño	1.50	265.17	96.23	46.88	26.83	4.74
Diseño 85%	0.22	38.89	14.11	6.88	3.94	0.70

ELABORADO POR: Herrera Diego.

4.5.1.- CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ESCALAS

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

- ◆ Las similitudes que predominan el fenómeno que va a ser analizado
- ◆ La disposición del espacio físico que se dispone para la implantación del en el laboratorio
- ◆ Los caudales tanto máximos como mínimos disponibles para la alimentación

- ◆ Dimensiones longitudinales máximas y mínimas de los elementos del prototipo
- ◆ Instrumentación disponible en el laboratorio de acuerdo al grado de precisión
- ◆ Condiciones de borde
- ◆ Factor económico

4.6.- INSTRUMENTACIÓN REQUERIDA

En esta investigación los resultados obtenidos serán a base de mediciones y observaciones en el modelo a escala por lo que uno de los aspectos más importantes es la instrumentación empleada en el laboratorio de hidráulica, aquí se tomarán mediciones tanto estáticas como dinámicas, se utilizarán instrumentos sencillos como piezómetros, manómetros, vertederos, limnímetros, micromolinetes, etc. Que son usados cuando el movimiento es muy lento o estático, cuando se trata de cambios dinámicos se requieren equipos más sofisticados y de alta precisión.

4.7.- RESTRICCIONES FÍSICAS EN EL LABORATORIO

Dentro de la modelación física, en laboratorio existen factores que influyen en la construcción del modelo, entre estos factores de restricción está la capacidad de las bombas en el laboratorio para generar un caudal adecuado que pueda reproducir las condiciones del prototipo, otro factor es el espacio físico disponible en laboratorio para la implantación del modelo hidráulico, el aspecto económico también es un papel decisivo al momento de elegir la escala que se ajuste a un óptimo trabajo del modelo hidráulico.

4.7.1.- LIMITACIÓN DE CAUDALES

Luego de hacer el pertinente cálculo de las escalas, se obtuvo resultados que no ameritan restricción ya que al construir el modelo hidráulico con una escala 1:04

necesitamos aportar al modelo con un caudal máximo igual a 54.05 l/s, lo cual no es ninguna restricción ya que la capacidad de las bombas con las que cuenta el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Central del Ecuador es de aproximadamente 100 lts/s.

4.7.2.- ESPACIO FÍSICO

El espacio físico para nuestro estudio en modelo hidráulico no genera problema ya que el área disponible dentro del laboratorio de Hidráulica de la Universidad Central del Ecuador ya está definido, es suficiente para implantar las modificaciones de estructura hidráulica a escala 1:04, cuyo requerimiento dimensional es de 10.00m de largo por 4.00m de ancho.

Se seleccionó la escala 1:04, pues es la que mejores condiciones de trabajo dio como resultado, ya que se obtuvo una escala geométrica y de caudales trabajable para obtener mejores resultados.

En el cual de canal del desarenador ocupa 8.00m de largo y 0.60m de ancho en promedio.

Capítulo V

CONSTRUCCIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DEL DESARENADOR Y REJILLA

5.1.- INTRODUCCIÓN

El modelo hidráulico físico reducido de la toma caucasiana construido en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador, ocupa un área de 10.00 m de largo por 4.00 m de ancho el cual ya se encuentra construido. Lo que se refiere a las estructuras que conforman la toma y el tramo de río ocupa un área aproximada de 2.00 m de longitud x 2.30m.

En cuanto a la modificación de la pendiente de fondo del desarenador y modificación de la rejilla, motivo de mi investigación, se tomó en cuenta la pendiente original del diseñador el cual hacía que las partículas tengan velocidades superiores a las permitidas. Siendo la velocidad del modelo anterior 0.40 m/s con una pendiente del 5%, y la velocidad con una pendiente del 3% fue de 0.30 m/s.

El caudal que correrá en el modelo es proporcionado por dos bombas hidráulicas (capacidad máxima = 100 l/s), para esta experimentación el caudal máximo del modelo es $Q_{\text{máx}} = 54.06$ l/s, que equivale $Q_{\text{máx}} = 1.73$ m³/s del prototipo con las que cuenta el laboratorio, este caudal luego de pasar por el modelo hidráulico es conducido a través de un canal de recolección hacia un sistema de bombeo que reenvía el agua al modelo hidráulico, completando así un ciclo de recirculación.

5.2.- PLANOS Y DETALLES DEL MODELO HIDRÁULICO

Los planos del modelo hidráulico construido en el laboratorio de hidráulica, fueron escalados (trabajados a escala) con base a la condición de similitud de Froude, tema que fue estudiado en el capítulo IV.

$$E = P/T.$$

$$T = P/E$$

Donde: T = terreno, P = plano y E = escala (1:04).

Longitud del desarenador: 13.89 m

$$T = 13.89 \text{ m} / 4$$

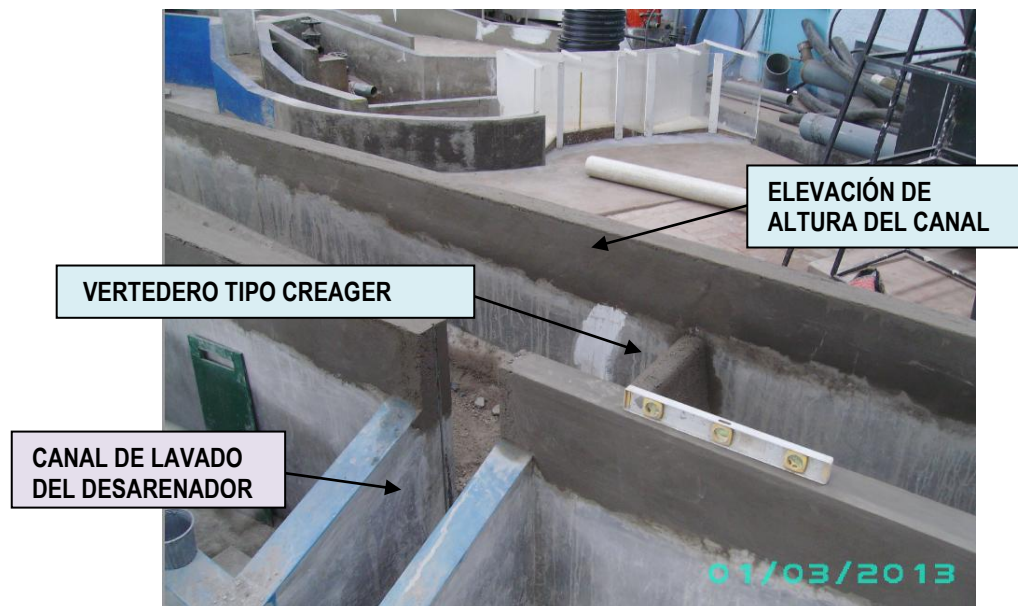
$T = 3.5 \text{ m}$ (longitud del desarenador en modelo).

Los planos y detalles del modelo hidráulico físico reducido constan en el anexo 5.1.

5.3.- MONTAJE

5.3.1.- DESARENADOR

Luego de establecer los parámetros de dimensionamiento del modelo, se procede a su montaje dentro del laboratorio, el cual partirá de una primera fase que consiste en replantear la geometría del modelo ya construido, tomando en cuenta que las medidas tienen que ser replanteadas con mucho cuidado para no tener errores en la modificación de pendientes y rediseño de rejilla, el cual puede llegar a cambiar el funcionamiento de la estructura de captación.



Fotografía 5.1. Modificación del modelo.(tomado por Herrera Diego)

5.3.2.- TOMA CON REJILLA DE FONDO O TIROLESA

Una vez concluida la fase de replanteo del modelo, inmediatamente empieza la conformación de la estructura de captación y cada una de las partes que la conforman, para ello previamente se escalaron los planos correspondientes a la toma del río Arturo del proyecto de riego Tabacundo que fueron proporcionados por el Gobierno Provincial de Pichincha, a fin de determinar las medidas en escala 1:04 que fue la elegida para la construcción del modelo (análisis descrito en el capítulo 4).

Los muros de confinamiento de la captación con toma de fondo y de cada uno de los elementos que la conforman, están elaborados a base de bloques alivianados y prensados de hormigón, unidos entre sí con mortero de relación 1:3 (ver fotografía 5.2) y revestidos de mortero a base de arena y cemento en relación 1:3, estos muros se encargan de confinar el material de relleno (ripió triturado Φ 5cm), material que ayuda en la obtención de las pendientes y desniveles requeridos en la implantación del canal desarenador y del tanque de carga, elementos que conforman la estructura de captación.



Fotografía 5.2. Mampostería de confinamiento conformada por unidades de bloque alivianado prensado.(tomado por: Herrera Diego)



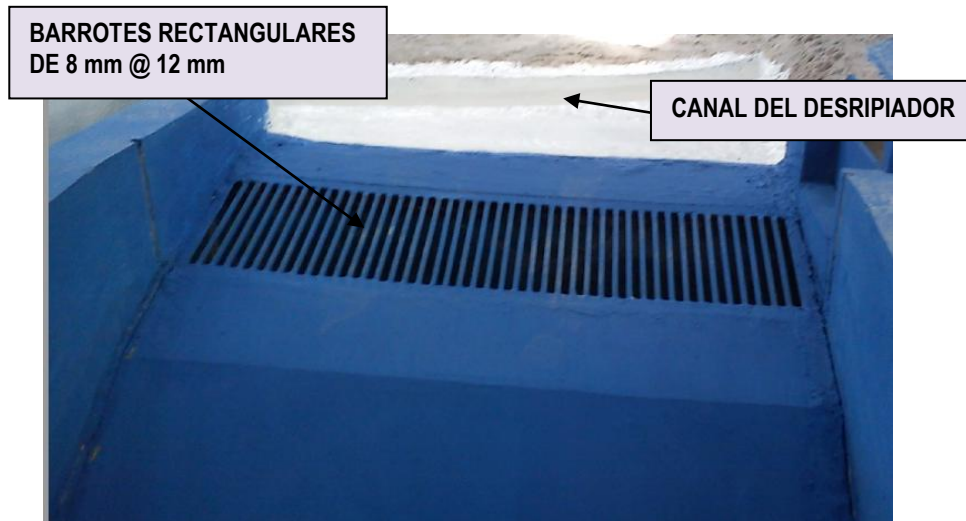
Fotografía 5.3. Material de relleno para el cambio de pendiente. (tomado por: Herrera Diego)

5.3.3.- AZUD Y REJILLA

Para lograr la optimización del caudal captado mediante la variación del ángulo de inclinación de la rejilla, se estructuró en metal el azud (ver fotografía 5.4) con la finalidad de conformar en un solo cuerpo rejilla-azud, con el propósito de obtener un mecanismo que permitiera variar la inclinación de la rejilla y azud sin causar modificaciones que alteren las similitudes de prototipo y modelo, por ende la superficie del azud se recubrió con una capa de hormigón para no descuidar la rugosidad (“n”), alisando todas las superficies para evitar resaltos y captar la mayor cantidad de agua.



Fotografía 5.4. Cambio de barrotos de la rejilla (tomado por Herrera Diego)



Fotografía 5.5. Estructura de la rejilla, operando su ángulo de inclinación. (tomado por Herrera Diego)

Para poder reproducir las condiciones de operación de la captación, se modeló un tramo del río en escala reducida igual a 2,00m cuyo cauce en el modelo se construyó sobre tableros hechos a base de rieles de eucalipto de 2.40 m de largo x 0.20m de alto y soportados por pingos de eucalipto distribuidos de manera tal que puedan soportar el peso de los materiales que conformaran el tramo del cauce del río Arturo en estudio, aguas arriba se construyó un pequeño tanque cuya función es la de ayudar a la distribución del caudal en el cauce del río “escalado” y reproducir la forma de aproximación requerida del agua hacia la captación con toma de fondo.

5.4.- EQUIPAMIENTO DEL LABORATORIO PARA LA INVESTIGACIÓN

Para el funcionamiento del modelo se requiere de la ayuda de un equipo complementario como son las bombas hidráulicas mismas que facilitan y garantizan trabajar con caudales necesarios como el $Q_{max} = 54.06$ l/s. Para controlar el caudal que ingresa o sale del modelo se emplea equipos de medición como el vertedero de sección rectangular que controla el ingreso del agua al modelo y un vertedero triangular en el canal de recirculación para calcular las pérdidas del caudal.



Fotografía 5.6. Vertedero rectangular, controla el caudal que ingresa en el modelo.(tomado por Herrera Diego)

Para las lecturas de los calados durante las pruebas hidráulicas se emplea un limnómetro que debe ir fijo sobre un apoyo previamente nivelado, para disminuir errores en las lecturas, este limnómetro está ubicado al final del canal desarenador aguas arriba del vertedero Creager, donde se toman las lecturas para poder calcular el caudal que fue captado en la rejilla.

CURVA DE DESCARGA VERTEDERO RECTANGULAR CON CONTRACCIONES LATERALES

Vertedero utilizado para aforar los caudales que pasan por el modelo físico.

Su ecuación corresponde a:

$$Q = C * b * h^{3/2} \text{ (ecuación general para vertederos)}$$

$$Q = Cd * \frac{2}{3} * \sqrt{2 * g} * b * h^{3/2}$$

$$Q = 1.088 * h^{3/2}$$

Donde:

Q = Caudal experimental

C = Coeficiente de descarga = 2.175

Cd = 0.737

b = ancho vertedero = 0.50 m

$$Q = 1.088 * h^{3/2}$$

Q experimental	Calado (h)	
l/s	m	
0.000	0.000	
0.385	0.005	
1.088	0.010	
1.999	0.015	
2.810	0.019	Q mínimo
3.077	0.020	
4.301	0.025	
5.653	0.030	
6.881	0.034	Q diseño 85% recomendado
7.124	0.035	
9.871	0.044	
10.386	0.045	
12.164	0.050	
12.190	0.050	Q medio
14.034	0.055	
15.990	0.060	
18.030	0.065	
20.150	0.070	
22.347	0.075	
24.619	0.080	
26.962	0.085	
29.376	0.090	
31.858	0.095	
34.406	0.100	
37.018	0.105	
39.693	0.110	
42.430	0.115	

45.227	0.120	
46.882	0.123	Q diseño
48.083	0.125	
50.997	0.130	
53.967	0.135	
54.057	0.135	Q máximo
56.993	0.140	
60.073	0.145	
63.207	0.150	
66.394	0.155	
69.632	0.160	
72.921	0.165	
76.261	0.170	
79.650	0.175	
83.088	0.180	
86.574	0.185	
90.107	0.190	
93.687	0.195	
97.314	0.200	

A continuación la curva de descarga del vertedero rectangular con contracciones:

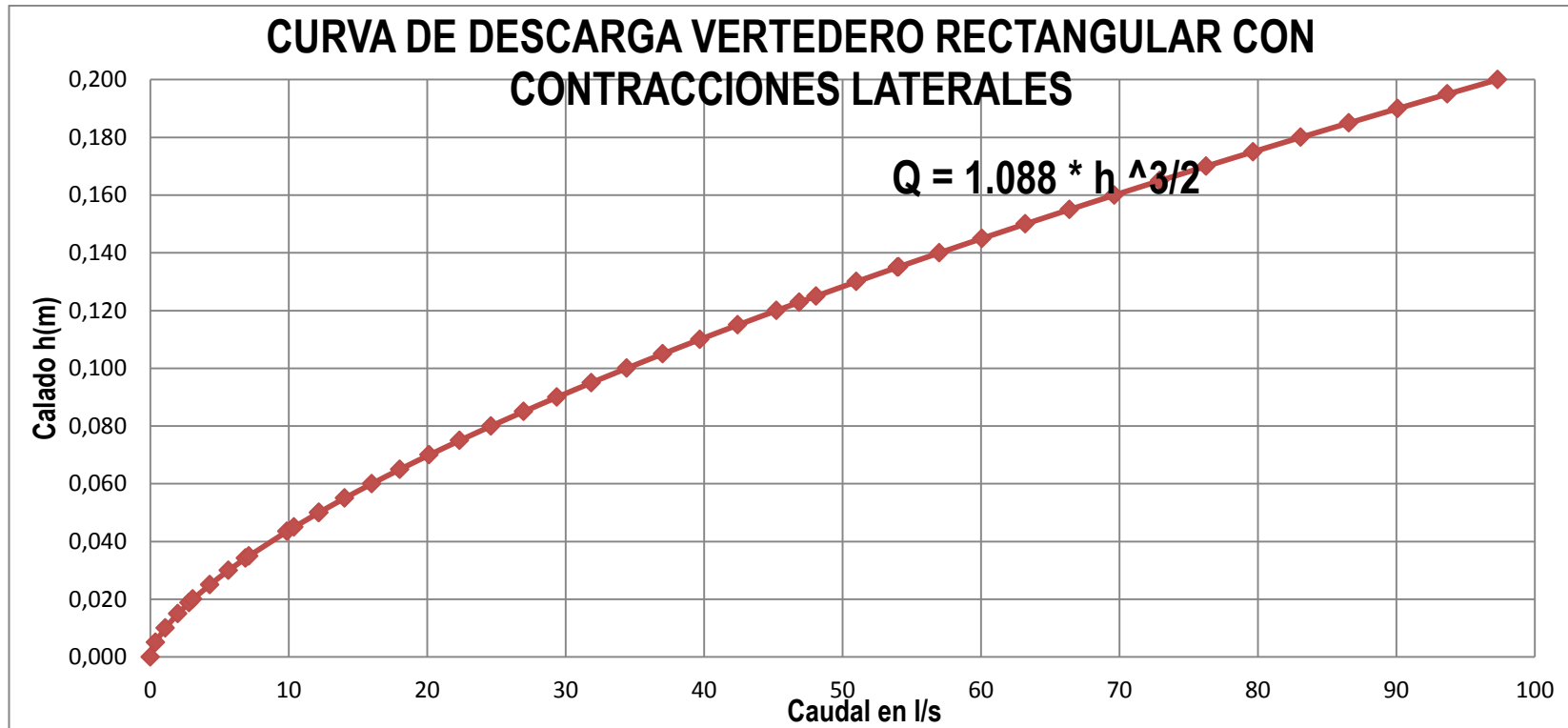
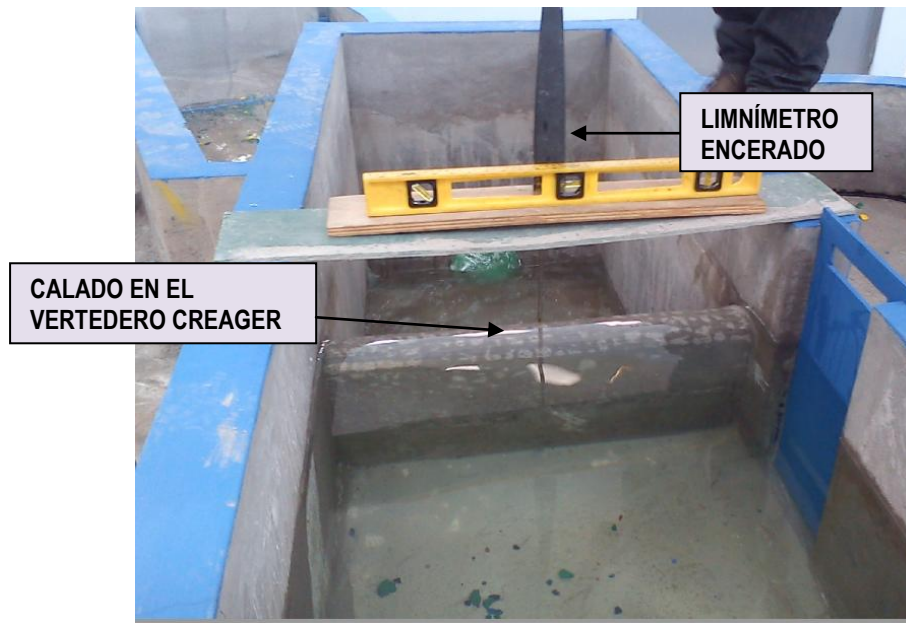


FIGURA 5.1 Curva de descarga vertedero rectangular con contracciones (Elaborado por Herrera Diego)



Fotografía 5.7. Limnómetro usado para la toma de datos. (tomado por: HerreraDiego)

CURVA DE DESCARGA VERTEDERO CREAGER

La ecuación de este vertedero está dada por:

$$Q = C * L * h^{3/2} \quad (\text{Ecuación general de vertederos})$$

Y se tiene que

$$C = C_d * \sqrt{2g}$$

donde:

Q = Caudal

L = ancho vertedero creager

h = altura del espejo de aguas

P = altura vertedero

C_d = Coeficiente de descarga

g = gravedad

El valor de C se lo obtiene de la curva del coeficiente de descarga (¹²), para lo que se calcula la relación de P/h y con este valor, se ingresa en la curva y se obtiene el coeficiente C, cabe señalar que las unidades de este valor están expresadas en el sistema Inglés.

¹² Fuente: "Diseño de Presas Pequeñas", una publicación técnica de recursos Hidráulicos USA, décima primera impresión Julio de 1982, p. 189

Datos

$$P = 0.39 \text{ m}$$

$$h_d = 0.07 \text{ m}$$

$$P/h_d = 5.500$$

$$C = 3.95 \text{ pie}^{1/2}/\text{s} \quad \text{Tomado de curva del coeficiente de descarga}$$

$$C = 2.18 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

Por lo que asumimos $C=2.18$

La ecuación del vertedero está expresada por:

$$Q = 1.635 * h^{3/2}$$

Q experimental	Calado (h)	
l/s	m	
0.000	0.000	
0.578	0.005	
1.635	0.010	
2.810	0.014	Q mínimo
3.004	0.015	
4.624	0.020	
6.463	0.025	
6.880	0.026	Q diseño 85% recomendado
8.496	0.030	
10.706	0.035	
12.190	0.038	Q medio
13.080	0.040	
15.608	0.045	
18.280	0.050	
21.089	0.055	
24.029	0.060	
27.095	0.065	
30.281	0.070	
33.582	0.075	
36.996	0.080	
40.518	0.085	
44.145	0.090	
46.880	0.094	Q diseño
47.874	0.095	
51.703	0.100	
54.060	0.103	Q máximo
55.629	0.105	

59.649	0.110
63.762	0.115
67.966	0.120
72.257	0.125
76.636	0.130
81.100	0.135
85.647	0.140
90.275	0.145
94.985	0.150

A continuación la curva de descarga del vertedero tipo Creager:

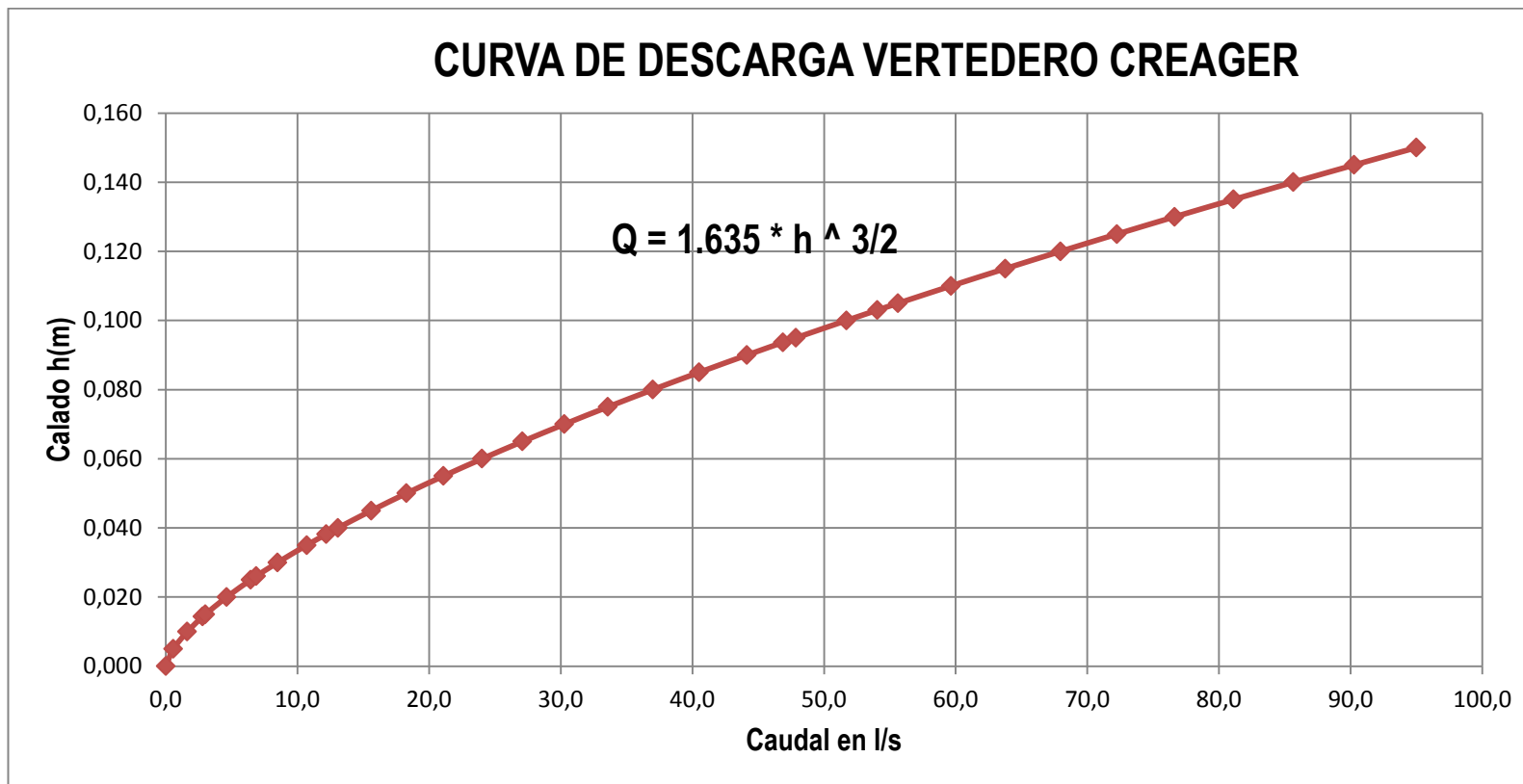


FIGURA 5.2 Curva de descarga vertedero tipo creager (Elaborado por Herrera Diego)

Finalmente contamos con dos vertederos, uno triangular de 60° (para medir caudales pequeños) y uno de forma rectangular sin contracciones (para medir caudales grandes), estos vertederos fueron ubicados a la salida del caudal del modelo, específicamente en el canal de recirculación.



Fotografía 5.8. Vertedero triangular de 60° (tomado por: Herrera Diego)

CURVA DE DESCARGA VERTEDERO TRIANGULAR

La ecuación de este vertedero está dada por:

$$Q = C * h^{5/2} \quad (\text{ecuación general de vertederos})$$

Donde C está dado por:

$$C = \frac{8}{15} * \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * \mu * h^{5/2}$$

Se ha aplicado la fórmula de Heyndrick debido a que es precisa para $\theta = 60^\circ$ y cargas normales.

$$\mu = [0.5775 + 0.214h^{1.25}] * \left\{1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)}\right]^2\right\}$$

Datos

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

w= 0.21 m

$\theta = 60.00^\circ$

Entonces tenemos que:

$\mu = 0.6307$

Por lo que asumimos $u=0.63$

$$Q = \frac{8}{15} * \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * \mu * h^{5/2}$$

$$Q = \frac{8}{15} * \sqrt{2 * 9.8} * \tan\left(\frac{60}{2}\right) * 0.63 * h^{5/2}$$

$$Q = 0.8588 * h^{5/2}$$

Q experimental	Calado (h)	
l/s	m	
0.000	0.000	
0.009	0.010	
0.049	0.020	
0.134	0.030	
0.275	0.040	
0.480	0.050	
0.757	0.060	
1.114	0.070	
1.555	0.080	
2.087	0.090	
2.716	0.100	
2.810	0.101	Q mínimo
3.447	0.110	
4.285	0.120	
5.234	0.130	
6.300	0.140	
6.880	0.145	Q diseño 85% recomendado
7.486	0.150	
8.796	0.160	
10.236	0.170	
11.808	0.180	
12.190	0.182	Q medio
13.517	0.190	
15.366	0.200	
17.360	0.210	
19.501	0.220	
21.793	0.230	

24.239	0.240	
26.844	0.250	
29.609	0.260	
32.539	0.270	
35.636	0.280	
38.903	0.290	
42.344	0.300	
45.962	0.310	
46.880	0.312	Q diseño
49.759	0.320	
53.738	0.330	
54.060	0.331	Q máximo
57.902	0.340	
62.253	0.350	
66.796	0.360	
71.532	0.370	
76.463	0.380	
81.593	0.390	
86.925	0.400	

A continuación la curva de descarga del vertedero triangular:

CURVA DE DESCARGA VERTEDERO TRIANGULAR

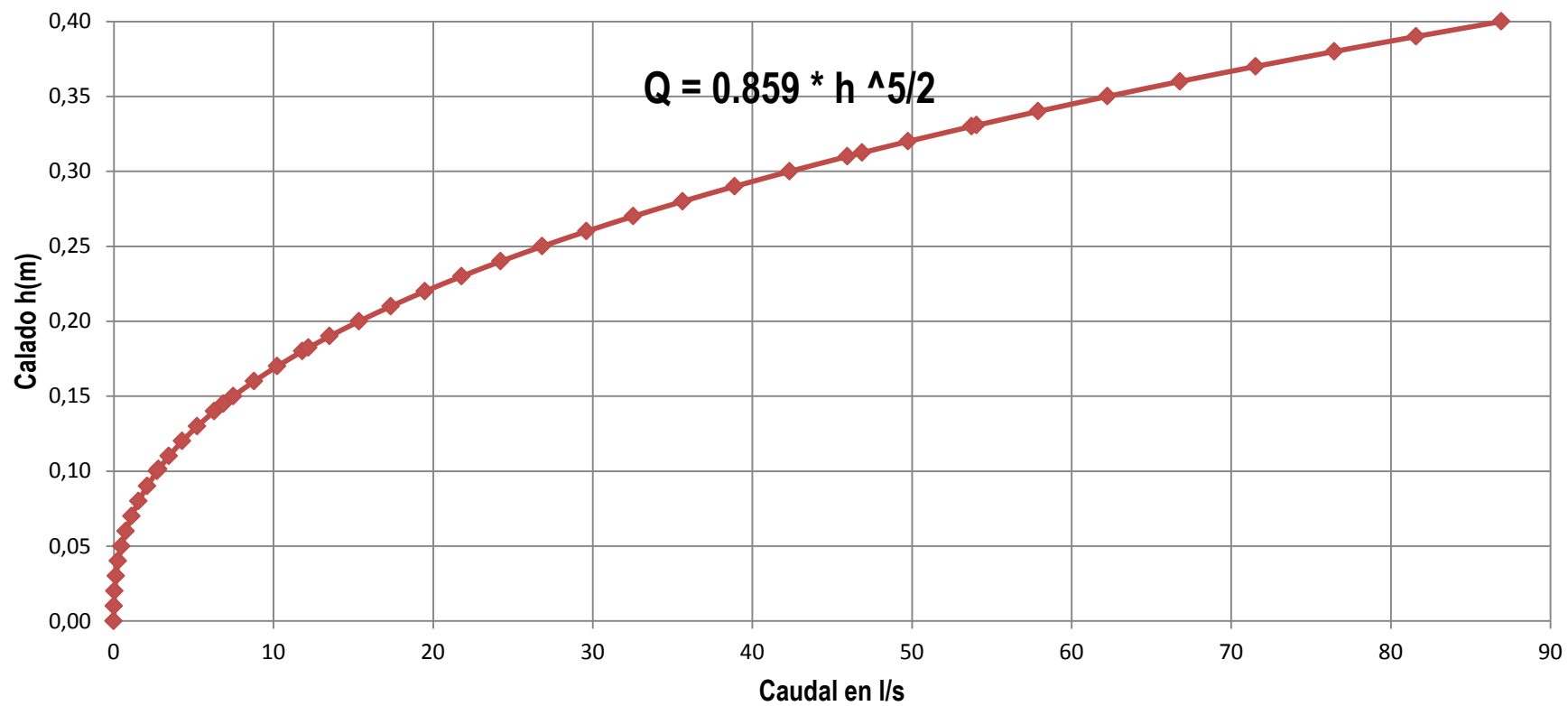


FIGURA 5.3 Curva de descarga vertedero triangular (Elaborado por Herrera Diego)

5.5.- EXPERIMENTACIÓN

ELABORACIÓN DE UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA PRÁCTICA ESTUDIANTIL CON EL MODELO

5.5.1.- OBJETIVOS DE LA EXPERIMENTACION

5.5.1.1.- OBJETIVOS GENERALES

- Aprender a operar el modelo físico para mejorar los conocimientos obtenidos en clase.
- Utilizar correctamente los equipos para la toma de mediciones.

5.5.1.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el comportamiento de una toma con rejilla de fondo o tirolesa.
- Estudiar el comportamiento del flujo de agua dentro de los elementos que componen la estructura de captación.
- Aplicar en forma práctica los conocimientos adquiridos en el curso de hidráulica.
- Interpretar los resultados obtenidos.
- Incentivar a las nuevas generaciones a la investigación, con la ayuda de modelos físicos, del comportamiento de diversos tipos de fenómenos con mira a mejorar las condiciones de vida de la comunidad.

5.5.2.- INTRODUCCIÓN

El modelo hidráulico físico de una Toma de Fondo tipo Caucásica o Tirolesa, construido en el laboratorio constituye una herramienta de gran importancia que se dispone para comprender de mejor manera el comportamiento del agua en una obra de captación.

El modelo permite además simular un tramo de río para poder observar la velocidad de aproximación del mismo a la estructura y el material de arrastre del mismo que puede producir taponamientos en la rejilla.

La rejilla constituye un elemento articulado que permite variar la inclinación de la misma para así, mejorar la captación de la toma.

El desarenador es un elemento muy importante en una obra de toma ya que permite observar los distintos tipos de flujo, así como se puede medir la velocidad de sedimentación.

El vertedero tipo Creager ubicado entre desarenador y el tanque de carga, este permite medir la altura vertiente y obtener el caudal de captación que será el que ingresa al tanque de carga y a continuación de este el agua derivada será conducida hacia el canal recirculación (¹³).

5.5.3.- EQUIPOS Y MATERIALES

- Limnímetros.
- Cinta métrica.
- Vertedero con perfil tipo Creager.
- Vertedero triangular de 60°.
- Micromolinete.
- Rocas pintadas (sedimentos).
- Mallas captadoras de sedimentos.
- Pintura.

5.5.4.- METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

- Se procede a encender las bombas y se observa que aumente el nivel del piezómetro que se encuentra en la parte superior derecha del control de las

¹³ Fuente: Narváez Mayra y Pérez Luis. Estudio en el modelo hidráulico físico del flujo en una toma de fondo tipo Caucásiana o Tirolesa

bombas, hasta aproximadamente 1.6 m, las bombas tienen un control automático con flotadores, que permite arrancar y parar su funcionamiento.

- Una vez verificado el nivel del piezómetro, se abre la válvula para que ingrese agua al tanque de carga por medio de una tubería de PVC de $\phi = 200$ mm para ingresar al modelo.
- Se procede a estabilizar el caudal con el que se va a realizar la práctica, mediante la medición del caudal a través del vertedero rectangular por el que sale el agua e ingresa al tanque de carga del modelo hidráulico.
- Para obtener los datos para el cálculo del caudal captado utilizamos un limnómetro.
- Se encera el limnómetro con la cresta del vertedero de perfil Creager y se procede a tomar las mediciones aguas arriba del mismo donde el efecto de la turbulencia no afecte a la toma de datos, con esto se obtuvo los caudales captados por la rejilla.
- Una vez obtenidas las medidas de la carga de agua tanto en el vertedero rectangular con contracciones como en el perfil Creager mediante las ecuaciones de los mismos se obtendrá el caudal de ingreso al modelo y el caudal de captación y su respectiva eficiencia.
- Como comprobación y para cuantificar las pérdidas que se pueden producir, se tomarán medidas en el canal de salida (recirculación) mediante un vertedero triangular para caudales.
- Se procederán a tabular los resultados obtenidos y a graficar las curvas de descarga.

5.5.5.- CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Dentro de este numeral está el procedimiento a seguir para obtener resultados cuantitativos que permitan sustentar técnicamente la explicación del distinto comportamiento que se produce en el flujo del agua al modificar una o varias condiciones de operación del sistema, algunas de estas condiciones pueden ser el variar la inclinación de la rejilla de captación, disminuir la pendiente del desarenador o simplemente aumentar el caudal de entrada para las pruebas hidráulicas.

Los cálculos que se deben realizar una vez obtenidos los resultados de la toma de datos con el limnómetro se deben realizar de la siguiente manera:

- El caudal total que ingresa al sistema se lo obtiene mediante la curva de descarga del vertedero rectangular con contracciones, se mide la altura del calado de agua en este vertedero con la cinta y se reemplaza en la siguiente fórmula:

$$Q_{tot} = 1.088 * h^{3/2}$$

- El caudal captado por la rejilla se lo obtiene mediante la curva de descarga del vertedero Creager (anexo 6.3), se mide la altura del calado de agua en este vertedero con el limnómetro y se reemplaza en la siguiente fórmula:

$$Q_{cap} = 1.635 * h^{3/2}$$

Una vez obtenidos el caudal total que ingresa al sistema y el de captación por la rejilla se procede a calcular la eficiencia de la rejilla que está dada por la relación entre el caudal captado y el caudal total que ingresa al sistema expresada en porcentaje:

$$E_{\%} = \frac{Q_{cap}}{Q_{tot}} * 100$$

De esta manera se obtiene la eficiencia de la rejilla y se procede a realizar las gráficas correspondientes de eficiencia vs caudal.

Con los resultados obtenidos de las corridas de pruebas con diferentes inclinaciones de la rejilla (16%, 19%, 20% y 30%) y con los gráficos de las eficiencias se puede realizar una comparación para que así el estudiante pueda ser crítico en el comportamiento que tiene una estructura hidráulica sometida a condiciones experimentales.

El desarrollo de cálculos y en función de los resultados que sean obtenidos sea el propio estudiante, futuro profesional, quien sea capaz de responder y dar solución a estas interrogantes desde un punto de vista sustentado y lógico.

5.5.6.- CONCLUSIONES

Después de haber realizado la práctica experimental y habiendo obtenido del procesamiento de datos, varios resultados numéricos, gráficos y visuales, el estudiante está ya en capacidad de emitir conclusiones valederas que expliquen y aclaren el por qué de los cambios del comportamiento en el flujo, así como de diversos comportamientos que derivan de la combinación entre las distintas condiciones de operación del sistema, puedan ser estas la disminución de pendiente del 5% al 3% que hacen que en cada lectura de datos ocurra un fenómeno diferente, por ejemplo cuando se realizan con diferentes caudales, el comportamiento de los sedimentos es diferente, la captación de sedimentos por el desarenador y la disminución de su velocidad.

5.5.7.- RECOMENDACIONES

Se recomienda que en la utilización del modelo hidráulico se debe hacer con mucho cuidado especialmente al encender el sistema de bombas debido a que el nivel del piezómetro no debe sobrepasar el nivel de 1.6 m de altura de agua, porque las bombas se apagan automáticamente y el agua puede rebosar al llegar al nivel máximo del piezómetro y luego al bajar el nivel se encienden de nuevo. Tomar las ecuaciones de cada curva de descarga para los diferentes vertederos y desarrollar los cálculos correctamente, para así elaborar las gráficas y obtener

correctamente los valores de eficiencia para cada porcentaje de inclinación de la rejilla de la toma.

Capítulo VI

ANÁLISIS DEL FLUJO EN UNA TOMA DE FONDO

6.1. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA TOMA DE FONDO DEL RÍO ARTURO DISEÑADA POR EL GOBIERNO DE LA PROVINCIA DE PICHINCHA

Para conseguir un funcionamiento adecuado de la toma diseñada por el Gobierno de la Provincia de Pichincha, que captará las aguas del río Arturo, su estudio en modelo hidráulico físico reducido, permite obtener parámetros para modificar el diseño de la captación, de ser el caso. La investigación realizada pretende evaluar y mejorar el comportamiento de la toma en conjunto y a su vez experimentar variantes de la inclinación de la rejilla para obtener una mayor eficiencia en la captación y disminuir la velocidad del flujo en el canal del desarenador.

La finalidad específica fue la modificación de la sección de los barrotos de circulares corrugados a cuadrados lisos para evaluar la respuesta de la capacidad de captación y también ha sido encontrar una alternativa de inclinación de la rejilla que permita mejorar la eficiencia de la captación de agua sin considerar la presencia marcada, que representan los arrastres sólidos. Con ese propósito se realizó los ensayos en el modelo hidráulico físico reducido para lograr una mejor comprensión cualitativa y cuantitativa del funcionamiento hidráulico, especialmente de la rejilla.

Los caudales con los que se realizaron las pruebas fueron el caudal máximo de crecida, el caudal medio, el caudal mínimo, el caudal de diseño, el caudal de diseño recomendado para riego que es el Q85%.

Se realizó la modelación de un tramo del río Arturo al que se le dió similares condiciones del cauce natural como son la pendiente y la topografía del sitio donde va a implantarse la toma.



Fotografía 6.1. Sitio de Captación, Cota 3500 m.s.n.m. ubicada en el río Arturo, Ecuador (tomado por: Herrera Diego)



Fotografía 6.2. Tramo de río modelado aproximadamente (tomado por: Herrera Diego)

El diseño original cuenta con un canal de purga y una compuerta para proceder a la limpieza y evacuación de los sedimentos represados detrás de la rejilla ya que aquí el calado del agua alcanzará $H_o = 0.31$ m antes de que el agua desborde por el azud e ingrese a la galería, es decir que el nivel del cauce se encuentra 0.31m más abajo del nivel de la rejilla, como se indica en la siguiente figura.

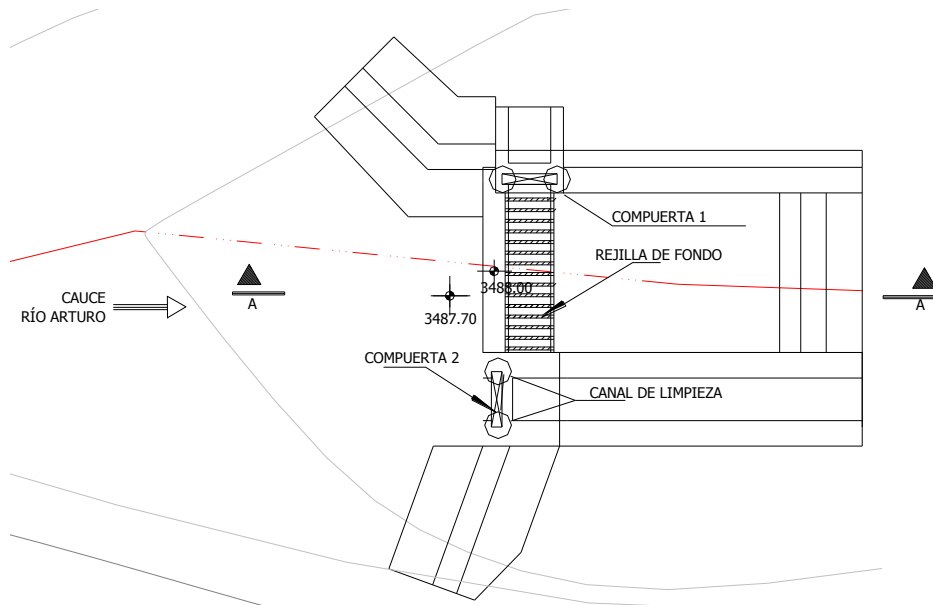


FIGURA 6.1. Planta - Toma de Fondo (Elaborado por Herrera Diego)

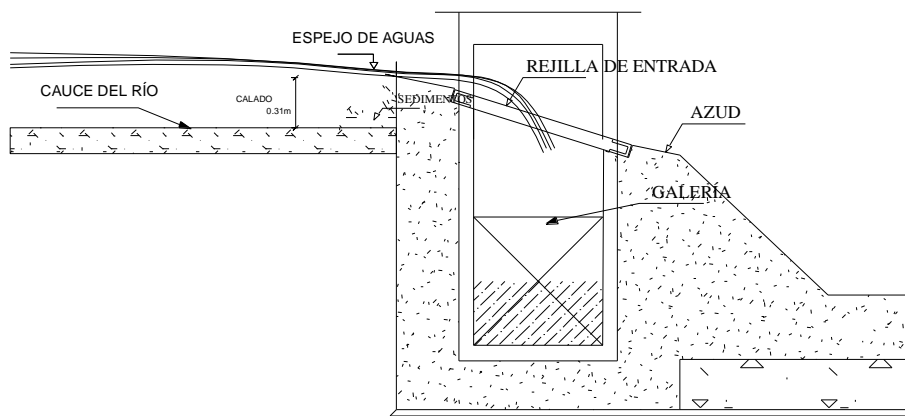


FIGURA 6.2. Corte A-A rejilla y galería (Elaborado por Herrera Diego)

La galería de recolección tiene una altura en promedio de 1.70 m, bastante grande por lo que, cuando se tiene gran caudal y por lo tanto altas velocidades el golpe de agua que se produce al impactar el chorro con el fondo de la galería produciría socavación y puede dañar a la estructura, además la construcción en modelo, fue bastante dificultosa.

El caudal derivado a través de la rejilla es evacuado satisfactoriamente, por el canal colector y es dirigido hacia la estructura desarenadora con su nueva pendiente del 3%, pasando primero por los canales de transición.

El desarenador, con caudales pequeños como son, el mínimo, el medio y el caudal recomendado para riego Q85%, funciona muy bien ya que los sedimentos que atraviesan por la rejilla se acumulan en el desarenador para su posterior evacuación a través del canal de limpieza ubicado al final del desarenador.

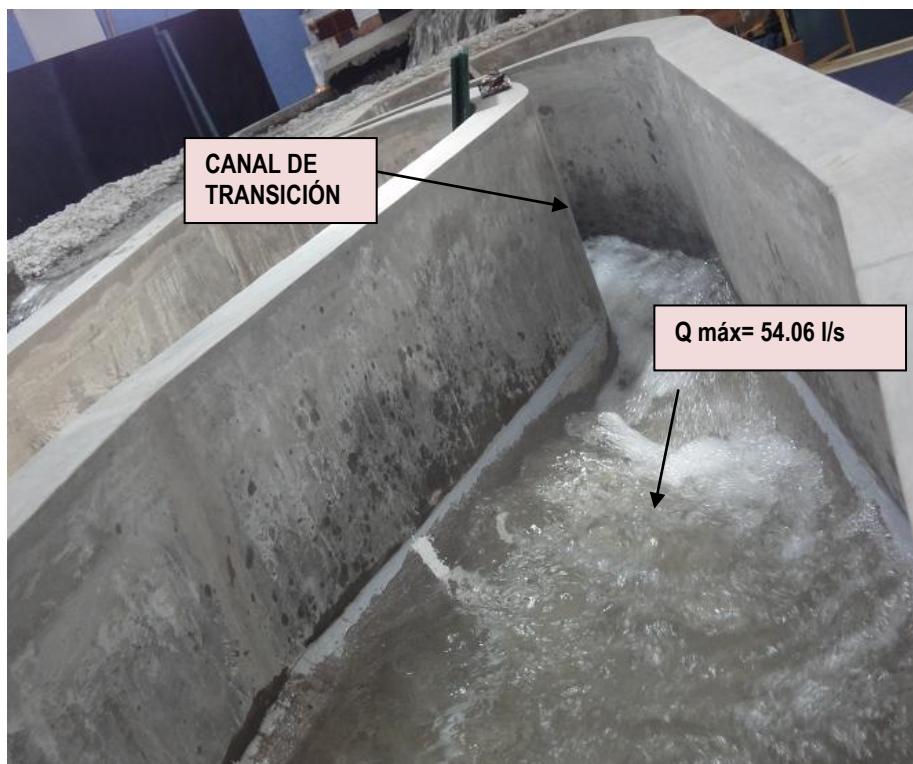


Fotografía 6.3. Flujo en el desarenador con pequeños caudales (tomado por: Herrera Diego)

Al realizar las pruebas con caudales mayores como son el de diseño, y el máximo se producen turbulencias y remolinos en el desarenador, y mientras más pequeña es la velocidad de paso por el vertedero, menos turbulencia causa en el desarenador por lo que reduce los materiales de arrastre.

Se ha observado que durante las crecientes o caudales máximos la cantidad de sólidos en ríos de montaña puede llegar a ser del 4% al 6% en volumen de caudal.

Con el objeto de facilitar el lavado concentrando las partículas hacia el centro conviene que el fondo tenga una pequeña caída hacia el centro del canal.



Fotografía 6.4. Flujo en la transición al ingreso al desarenador con grandes caudales (tomado por Herrera Diego)

6.2. ENSAYOS DEL MODELO.

Los ensayos consistieron en la toma de datos que permitan calcular el caudal que capta el sistema estableciendo de esta manera un adecuado funcionamiento del modelo y obtener la mínima obstrucción de sedimentos en la rejilla.

Se procedió a ingresar cada uno de los caudales: con los que se realizó las pruebas, estos son:

TABLA N° 6.1. Tabla de caudales para prototipo y modelo

CAUDALES DEL MODELO FÍSICO REDUCIDO		
	PROTOTIPO	MODELO
	m^3/s	l/s
CAUDAL MÁXIMO	1.73	54.06
CAUDAL MÍNIMO	0.09	2.81
CAUDAL MEDIO	0.39	12.19
CAUDAL DE DISEÑO	1.50	46.88
CAUDAL DE DISEÑO RECOMENDADO 85%	0.22	6.88

ELABORADO POR: Herrera Diego..

A cada uno de los caudales con los que se realizaron las pruebas le corresponde una determinada altura la cual está expresada en la tabla 6.2.

TABLA N° 6.2. Tabla de caudales y sus alturas correspondientes para el vertedero rectangular con contracciones

DESCRIPCIÓN	CAUDAL DEL MODELO	CAUDAL DEL PROTOTIPO	CALADO EN EL VERTEDERO
	l/s	m ³ /s	cm
CAUDAL MÍNIMO (Q _{min})	2.81	0.09	1.88
CAUDAL DE DISEÑO RECOMENDADO 85%	6.88	0.22	3.42
CAUDAL MEDIO (Q _{med})	12.19	0.39	5.01
CAUDAL DE DISEÑO (Q _{1.15%})	46.88	1.5	12.29
CAUDAL MÁXIMO (Q _{máx})	54.06	1.73	13.52

ELABORADO POR: Herrera Diego..

De tal manera el procedimiento a seguir fue estabilizar los caudales de ingreso al sistema de toma, para posteriormente obtener el caudal de captación mediante el vertedero de pared delgada con borde circular ubicado al final del desarenador, el cual aumentó su altura en 15 cm por la disminución de pendiente de 5% a 3%.

VERTEDERO TRIANGULAR

La ecuación de este vertedero está dada por:

$$Q = C * h^{5/2} \quad (\text{ecuación general de vertederos})$$

Donde C está dado por:

$$C = \frac{8}{15} * \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * \mu * h^{5/2}$$

Se ha aplicado la fórmula de Heyndrick debido a que es precisa para $\theta = 60^\circ$ y cargas normales.

$$\mu = [0.5775 + 0.214h^{1.25}] * \left\{1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)}\right]^2\right\}$$

Datos:

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

$$w = 0.21 \text{ m}$$

$$\theta = 60.00^\circ$$

Entonces tenemos que:

$$\mu = 0.6307$$

Por lo que asumimos $\mu=0.63$

$$Q = \frac{8}{15} * \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * \mu * h^{5/2}$$

$$Q = \frac{8}{15} * \sqrt{2 * 9.8} * \tan\left(\frac{60}{2}\right) * 0.63 * h^{5/2}$$

$$\mathbf{Q = 0.8588 * h^{5/2}}$$

VERTEDERO RECTANGULAR CON CONTRACCIONES LATERALES

Vertedero utilizado para aforar los caudales que pasan por el modelo físico.

Su ecuación corresponde a:

$$Q = C * b * h^{3/2} \quad (\text{ecuación general para vertederos})$$

$$Q = Cd * \frac{2}{3} * \sqrt{2 * g} * b * h^{3/2}$$

$$Q = 1.088 * h^{3/2}$$

Donde:

Q = Caudal experimental

C = Coeficiente de descarga = 2.175

Cd = 0.737

b = ancho vertedero = 0.50 m

$$\mathbf{Q = 1.088 * h^{3/2}}$$

6.3. PLANTEAMIENTOS DE VARIANTES DE LA INCLINACIÓN DE LA REJILLA PARA EL MEJORAMIENTO DEL FLUJO

En esta etapa de la investigación se plantean las variantes que definen el ángulo de inclinación de la rejilla con el objeto de determinar la que mejor capte el agua y

deje pasar los sedimentos este valor se encuentra entre el 14% y el 20%, de las variaciones hechas en el laboratorio, así obtuvimos cuatro inclinaciones de la rejilla 16%, 19%, 20% y 30%, la cual el diseñador toma 19% en el diseño original realizado por el Consejo Provincial de Pichincha.

6.3.1.- DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA. PRIMERA VARIANTE (16%)

Inclinación del 16% ($\alpha = 9.11^\circ$):

La primera prueba se la realiza dando una inclinación a la rejilla con respecto a la horizontal del 16%, como podemos apreciar en la figura 6.3.

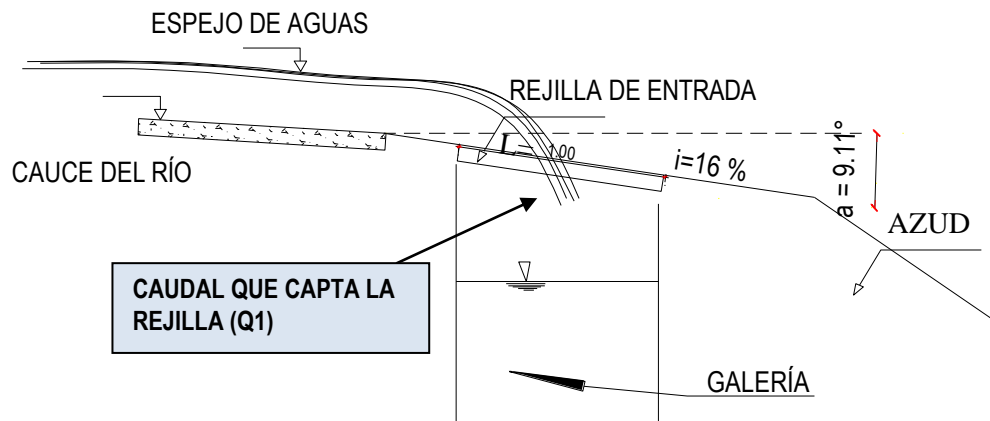


FIGURA 6.3 Variante de la inclinación de la rejilla 16% (Elaborado por Herrera Diego)

Dada la inclinación requerida se procederá con la toma de datos en el modelo, los caudales de ingreso al sistema de captación, como se mencionó anteriormente, fueron regulados y estabilizados mediante un vertedero rectangular con contracciones laterales ubicado en el tanque de carga, sus alturas de calado constan en la tabla 6.1.

En la siguiente figura se muestra el vertedero de pared delgada con borde circular, el ingreso del caudal del canal desarenador por sobre su cresta hacia la conducción.

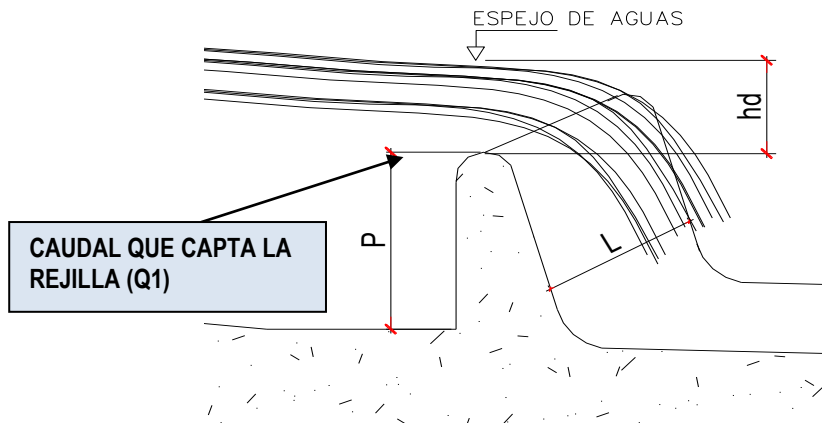


FIGURA 6.4 Vertedero de pared delgada con borde circular (Elaborado por Herrera Diego)

Donde:

L = ancho vertedero de pared delgada con borde circular

h_d = altura del espejo de aguas

P = altura vertedero

En donde el vertedero de pared delgada con borde circular tiene la función de conducir el caudal libre de sedimentos hacia el cajón recolector, y el vertedero rectangular con contracciones laterales conduce el caudal total hacia el modelo.

Para esta variante los resultados obtenidos fueron los siguientes:

TABLA N° 6.3. Calados obtenidos en el vertedero de pared delgada con una inclinación del 16%

CAUDALES(l/s)	Lecturas de las alturas (hd) tomadas en mm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo (2.81)	14.30	14.20	14.40	14.50	14.20	14.10	14.30	14.40	14.50	14.30
Diseño 85% (6.88)	25.58	25.79	25.79	26.10	25.90	26.21	25.79	26.10	26.00	25.79
Medio (12.19)	36.68	33.71	35.40	36.15	36.46	35.83	35.72	35.93	35.83	36.15
Diseño (46.88)	69.96	69.96	69.64	69.75	69.85	70.17	71.02	71.13	70.60	70.38
Máximo (54.06)	70.28	71.13	70.81	71.23	71.13	70.81	71.23	70.49	70.28	71.23

ELABORADO POR: Herrera Diego.

TABLA N° 6.4. Cálculo de la Eficiencia de la rejilla con una inclinación del 16%

CAUDALES (l/s)	Vertedero Rectangular con Contracciones		Vertedero de pared delgada con borde circular			Diferencia de caudales	Eficiencia
	h (m)	Q (l/s)	L (m)	h ₁ (m)	Q ₁ (l/s)	Q ₂ (l/s)	Δ %
Mínimo (2.81)	0.019	2.81	0.75	0.01	2.80	0.01	99.65
Diseño 85% (6.88)	0.034	6.88	0.75	0.03	6.82	0.06	99.20
Medio (12.19)	0.050	12.19	0.75	0.04	11.07	1.12	90.85
Diseño (46.88)	0.123	46.88	0.75	0.07	30.45	16.42	64.96
Máximo (54.06)	0.135	54.06	0.75	0.07	30.85	23.21	57.07

ELABORADO POR: Herrera Diego.

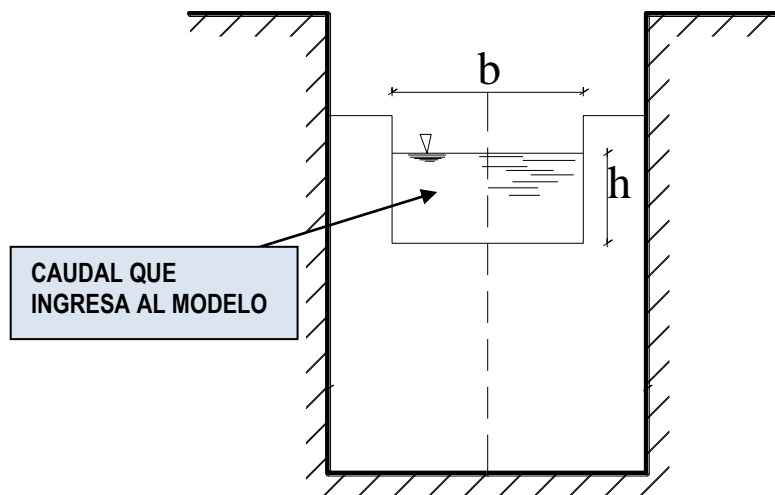


FIGURA 6.5 Vertedero rectangular con contracciones laterales (Elaborado por Herrera Diego)

Donde:

- h (m)= Carga sobre el vertedero rectangular por donde ingresa el caudal en el modelo
- Q (l/s) = Caudal total que ingresa al modelo
- L (m)= Longitud del vertedero de pared delgada con borde circular.
- Q₁ (l/s) = Caudal que se capta en la rejilla
- h₁ (m)= Promedio de lecturas tomadas en m
- Q₂ (l/s) = Caudal que no se capta
- Δ (%) = Eficiencia

La siguiente figura representa la curva de la eficiencia vs el caudal captado con la inclinación de 16%.

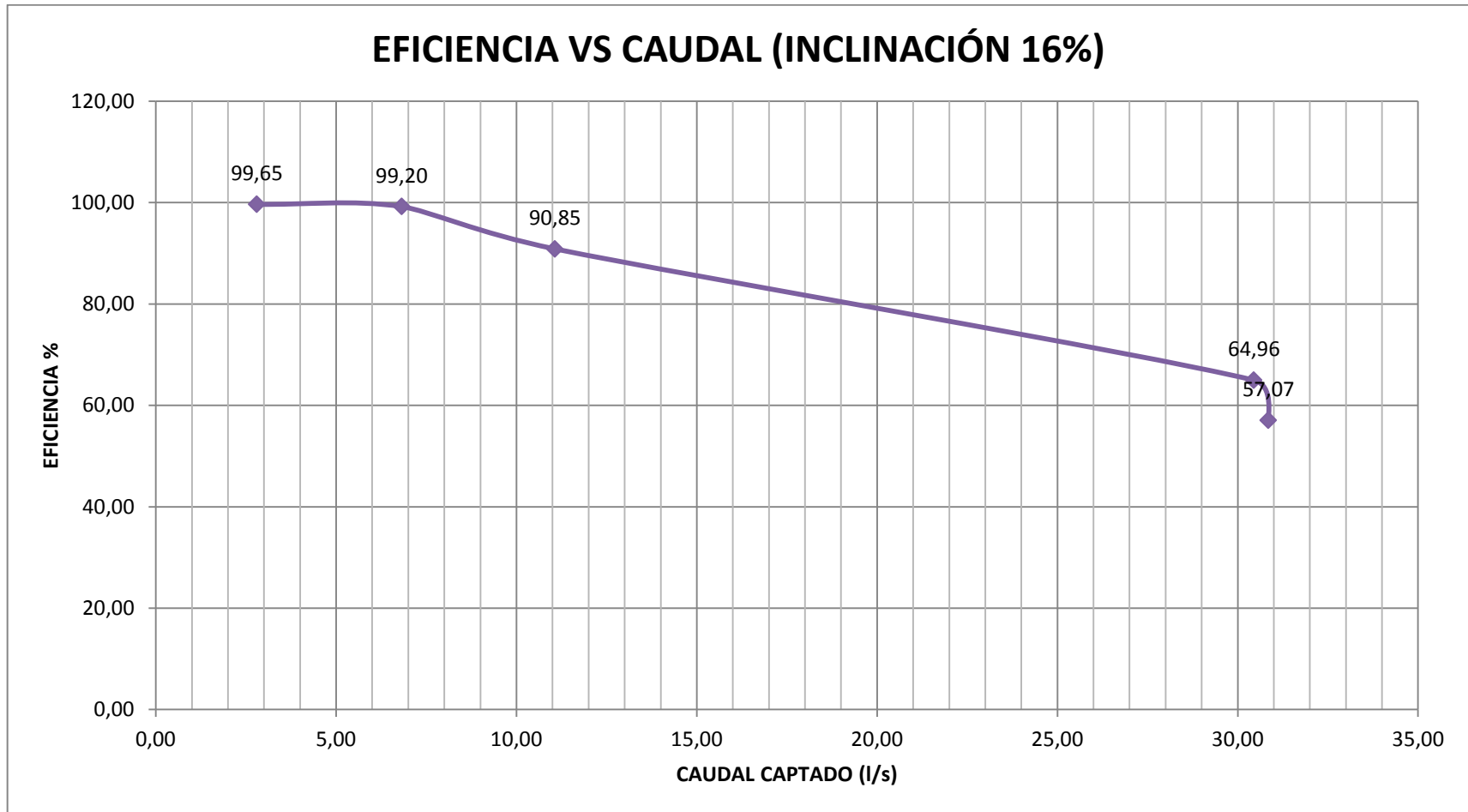


FIGURA 6.6 Eficiencia Vs Caudal 16% de la inclinación de la rejilla (Elaborado por Herrera Diego).

6.3.2.- DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA SEGUNDA VARIANTE (19%)

Inclinación del 19% ($\alpha = 10.73^\circ$):

La segunda prueba se la realiza dando una inclinación a la rejilla con respecto a la horizontal del 19%, como podemos apreciar en la figura 6.10.

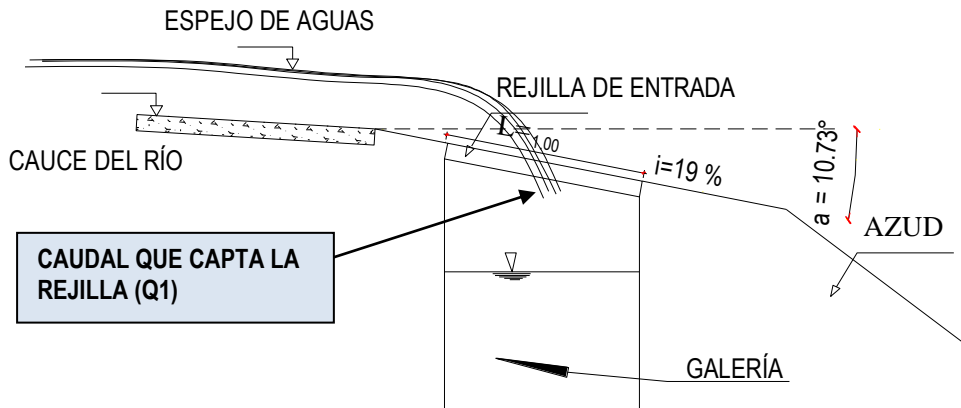


FIGURA 6.7 Variante de la inclinación de la rejilla 19% (Elaborado por Herrera Diego)

En la siguiente figura se muestra el vertedero de pared delgada con borde circular, el ingreso del caudal del canal desarenador por sobre su cresta hacia la conducción.

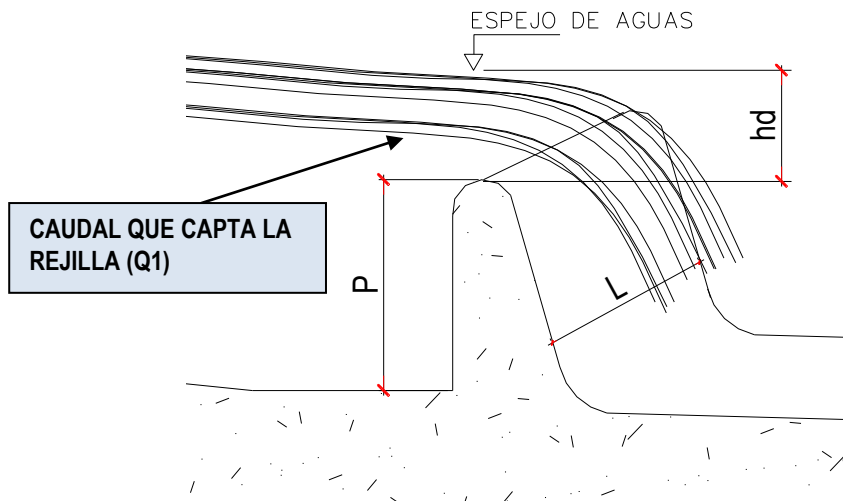


FIGURA 6.8 Vertedero de pared delgada con borde circular (Elaborado por Herrera Diego)

Donde:

L = ancho vertedero de pared delgada con borde circular.

h_d = altura del espejo de aguas

P = altura vertedero

TABLA N° 6.5. Calados obtenidos en el vertedero de pared delgada con una inclinación del 19%

CAUDALES (l/s)	Lecturas de las alturas (h_d) tomadas en mm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo (2.81)	14.4	14.5	14.3	14.3	14.1	14.5	14.3	14.2	14.0	13.7
Diseño 85% (6.88)	24.9	25.0	24.7	24.8	24.7	25.5	24.5	24.4	24.6	24.8
Medio (12.19)	33.9	33.8	33.5	33.6	34.2	34.4	33.9	33.8	33.9	33.7
Diseño (46.88)	79.8	80.1	79.4	79.7	79.6	79.3	79.7	79.9	79.8	79.6
Máximo (54.06)	85.2	86.4	86.2	85.5	84.8	85.7	85.2	86.1	85.3	85.6

ELABORADO POR: Herrera Diego.

TABLA N° 6.6. Cálculo de la Eficiencia de la rejilla con una inclinación del 19%

CAUDALES (l/s)	Vertedero Rectangular con Contracciones		Vertedero de pared delgada con borde circular			Diferencia de caudales	Eficiencia
	h (m)	Q (l/s)	L (m)	h_1 (m)	Q_1 (l/s)	Q_2 (l/s)	Δ %
Mínimo (2.81)	0.019	2.81	0.75	0.01	2.76	0.05	98.35
Diseño 85% (6.88)	0.034	6.88	0.75	0.02	6.38	0.50	92.79
Medio (12.19)	0.050	12.19	0.75	0.03	10.18	2.01	83.48
Diseño (46.88)	0.123	46.88	0.75	0.08	36.79	10.09	78.48
Máximo (54.06)	0.135	54.06	0.75	0.09	40.99	13.07	75.82

ELABORADO POR: Herrera Diego.

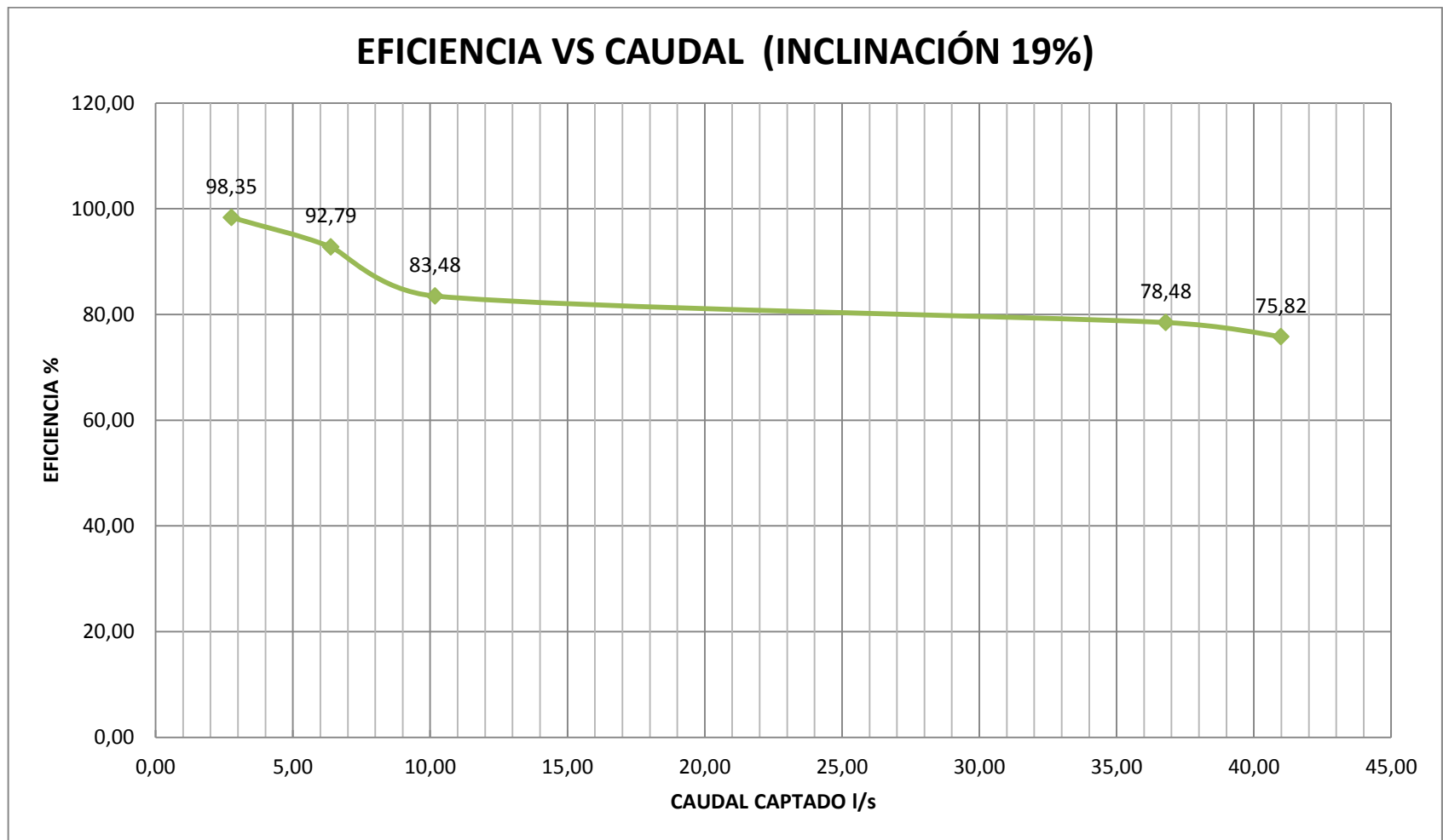


FIGURA 6.9 Eficiencia Vs Caudal 19% de la inclinación de la rejilla (Elaborado por Herrera Diego).

6.3.3.- DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA TERCERA VARIANTE (20%)

Inclinación del 20% ($\alpha = 11.30^\circ$):

La tercera prueba se la realiza dando una inclinación a la rejilla con respecto a la horizontal del 20%, como podemos apreciar en la figura 6.14

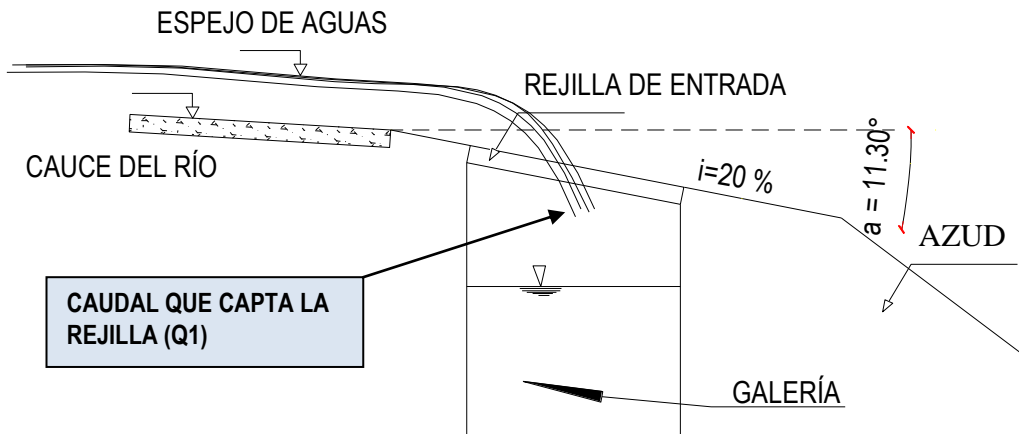


FIGURA 6.10 Variante de la inclinación de la rejilla 20% (Elaborado por Herrera Diego)

En la siguiente figura se muestra el vertedero de pared delgada con borde circular, el ingreso del caudal del canal desarenador por sobre su cresta hacia la conducción.

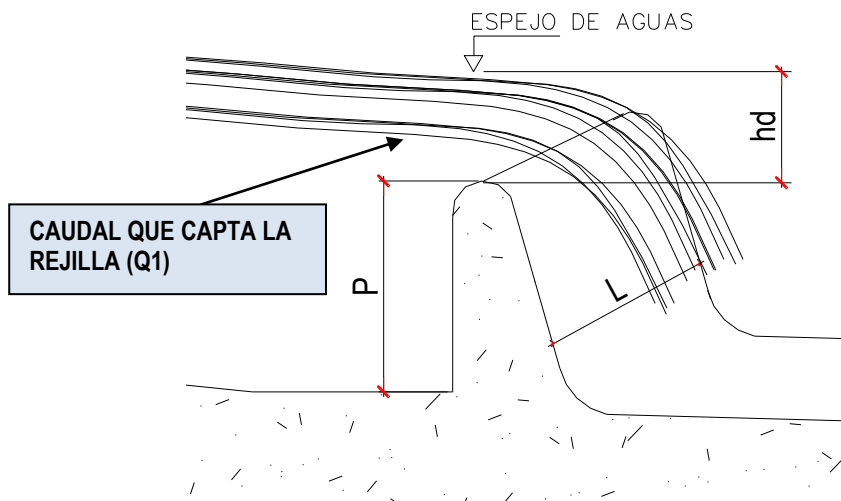


FIGURA 6.11 Vertedero de pared delgada con borde circular (Elaborado por Herrera Diego)

Donde:

L = ancho vertedero de pared delgada con borde circular

h_d = altura del espejo de aguas

P = altura vertedero

TABLA N° 6.7. Calados obtenidos en el vertedero de pared delgada con una inclinación del 20%

CAUDALES(l/s)	Lecturas de las alturas (hd) tomadas en mm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo (2.81)	14.5	14.6	14.4	14.4	14.2	14.6	14.4	14.3	14.1	13.8
Diseño 85% (6.88)	25.2	25.3	24.9	25.1	24.9	25.8	24.7	24.6	24.8	25.1
Medio (12.19)	34.2	34.1	33.8	33.9	34.5	34.7	34.2	34.1	34.2	34
Diseño (46.88)	80.6	80.9	80.2	80.5	80.4	80.1	80.5	80.7	80.6	80.4
Máximo (54.06)	86.1	87.3	87.1	86.4	85.7	86.6	86.1	87.0	86.2	86.5

ELABORADO POR: Herrera Diego.

TABLA N° 6.8. Cálculo de la Eficiencia de la rejilla con una inclinación del 20%

CAUDALES (l/s)	Vertedero Rectangular con Contracciones		Vertedero de pared delgada			Diferencia de caudales	Eficiencia
	h (m)	Q (l/s)	L (m)	h_1 (m)	Q_1 (l/s)	Q_2 (l/s)	Δ %
Mínimo (2.81)	0.019	2.81	0.75	0.01	2.81	0.01	99.76
Diseño 85% (6.88)	0.034	6.88	0.75	0.03	6.48	0.39	94.26
Medio (12.19)	0.050	12.19	0.75	0.03	10.33	1.86	84.77
Diseño (46.88)	0.123	46.88	0.75	0.08	37.35	9.53	79.68
Máximo (54.06)	0.135	54.06	0.75	0.09	41.61	12.45	76.97

ELABORADO POR: Herrera Diego.

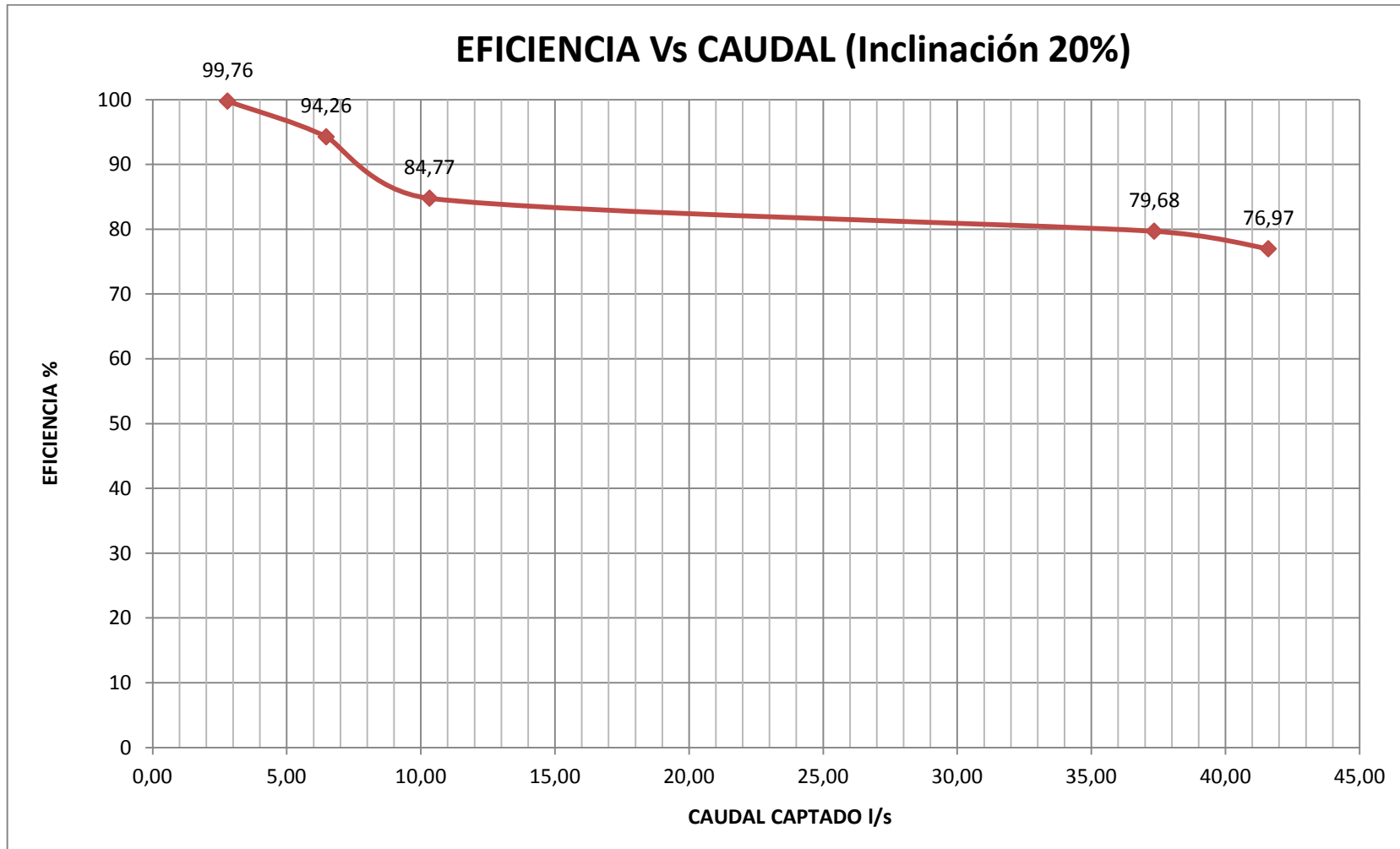


FIGURA 6.12 Eficiencia Vs Caudal 20% de la inclinación de la rejilla (Elaborado por Herrera Diego).

6.3.4.- DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA REJILLA CUARTA VARIANTE (30%)

Inclinación del 30% ($\alpha = 16.70^\circ$):

La cuarta prueba se la realiza dando una inclinación a la rejilla con respecto a la horizontal del 30%, como podemos apreciar en la figura 6.17.

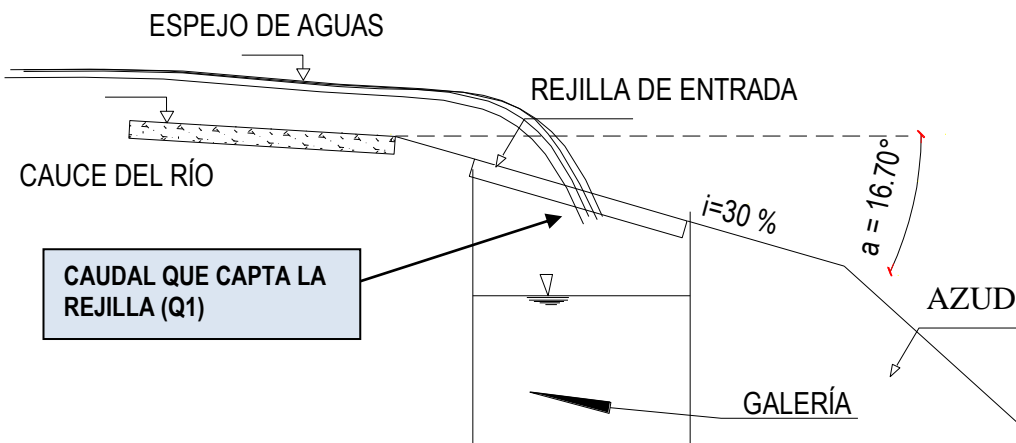


FIGURA 6.13 Variante de la inclinación de la rejilla 30% (Elaborado por Herrera Diego)

En la siguiente figura se muestra el vertedero de pared delgada con borde circular, el ingreso del caudal del canal desarenador por sobre su cresta hacia la conducción.

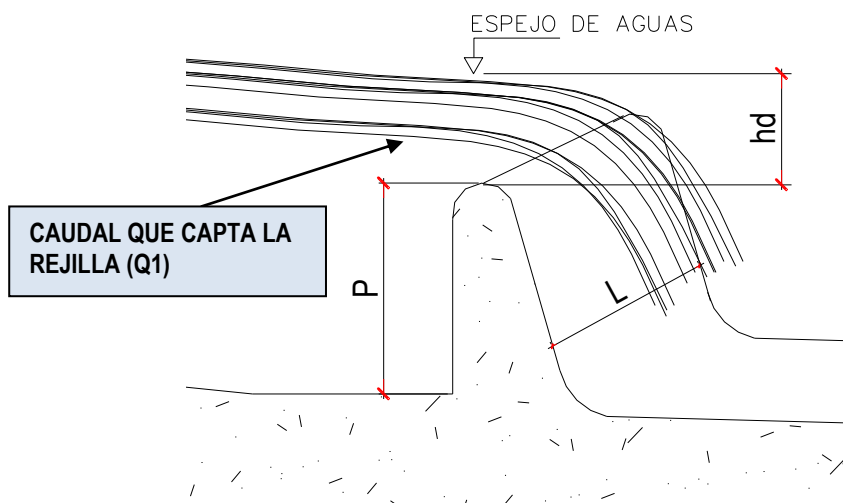


FIGURA 6.14 Vertedero de pared delgada con borde circular (Elaborado por Herrera Diego)

Donde:

L = ancho vertedero de pared delgada con borde circular

h_d = altura del espejo de aguas

P = altura vertedero

TABLA N° 6.9. Calados obtenidos en el vertedero de pared delgada con una inclinación del 30%

CAUDALES (l/s)	Lecturas de las alturas (h_d) tomadas en mm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo (2.81)	13.8	14.2	13.9	13.7	14.1	14.3	13.8	14.1	14.2	14.0
Diseño 85% (6.88)	23.4	23.2	23.4	23.6	23.5	23.2	23.4	23.3	23.0	23.9
Medio (12.19)	32.5	32.8	32.6	32.1	32.7	32.4	32.5	32.7	32.8	32.1
Diseño (46.88)	60.6	61.3	61.5	61	61.2	61.6	60.7	60.8	61.2	61.4
Máximo (54.06)	65.1	65.4	64.8	65.2	64.9	65.6	65	65.3	65.5	65.3

ELABORADO POR: Herrera Diego.

TABLA N° 6.10. Cálculo de la Eficiencia de la rejilla con una inclinación del 30%

CAUDALES (l/s)	Vertedero Rectangular con Contracciones		Vertedero de pared delgada con borde circular			Diferencia de caudales	Eficiencia
	h (m)	Q (l/s)	L (m)	h_1 (m)	Q_1 (l/s)	Q_2 (l/s)	Δ %
Mínimo (2.81)	0.019	2.81	0.75	0.01	2.71	0.10	96.43
Diseño 85% (6.88)	0.034	6.88	0.75	0.02	5.85	1.02	85.10
Medio (12.19)	0.050	12.19	0.75	0.03	9.59	2.60	78.70
Diseño (46.88)	0.123	46.88	0.75	0.06	24.72	22.16	52.74
Máximo (54.06)	0.135	54.06	0.75	0.07	27.24	26.83	50.38

ELABORADO POR: Herrera Diego.

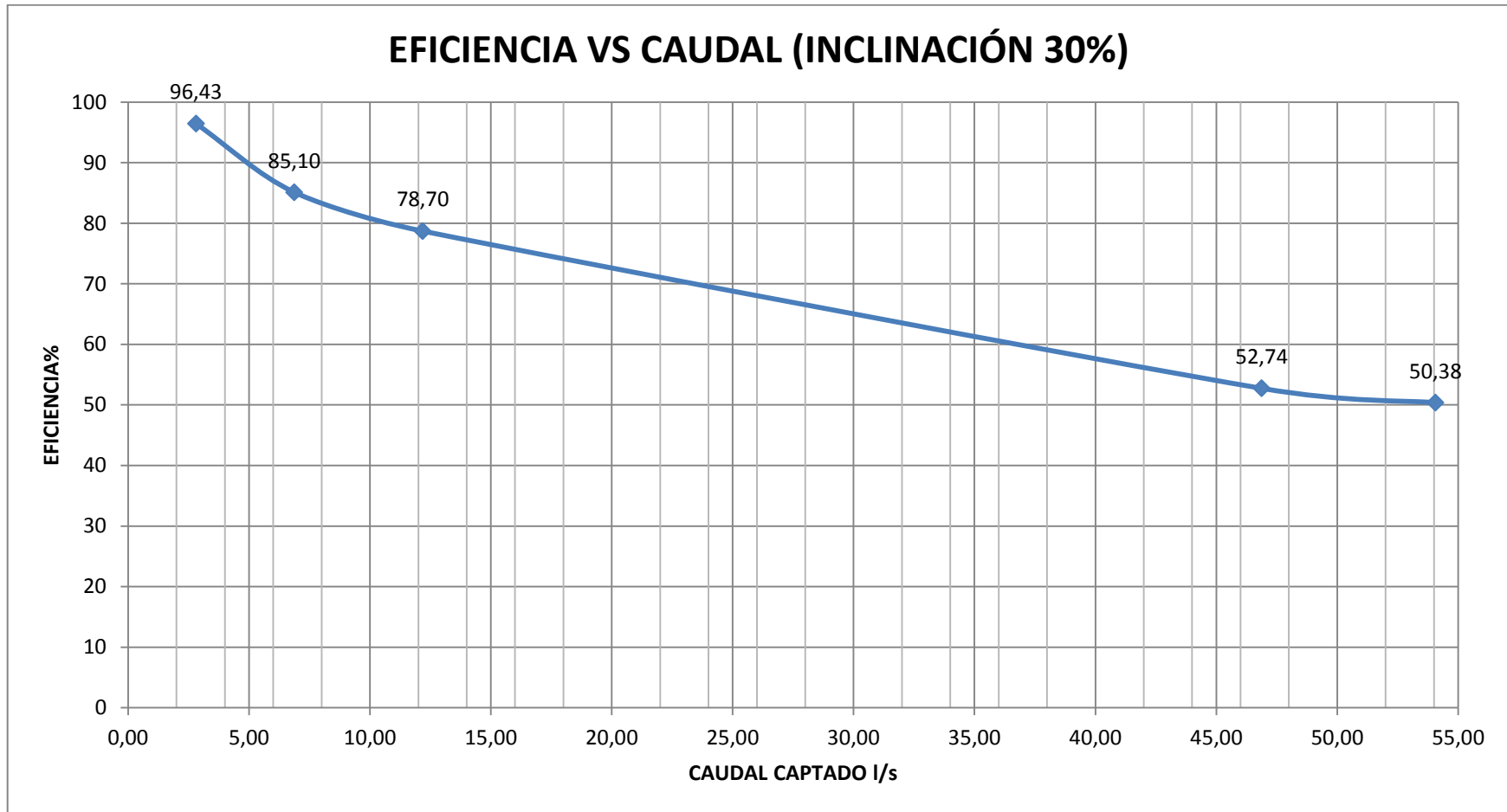


FIGURA 6.15 Eficiencia Vs Caudal 20% de la inclinación de la rejilla (Elaborado por Herrera Diego).

Para la comprobación del caudal de ingreso al modelo y para cuantificar las posibles pérdidas de caudal se ubicó en el canal de recirculación del laboratorio un vertedero triangular de 60 grados, en el cual se midió el caudal.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

**COMPROBACIONES DE CAUDALES PARA UNA INCLINACION DE
REJILLA AL 20%**

Ecuación del vertedero triangular ubicado en el canal de recirculación

$$Q = \frac{8}{15} * \sqrt{2 * 9.8} * \tan(60/2) * h^{5/2}$$

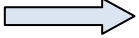

Q = 0.859*h^{5/2}

TABLA N° 6.11. . Caudales calculados con el vertedero triangular.

CAUDALES (l/s)	Vertedero Rectangular con contracciones laterales		Vertedero Triangular canal de recirculación	
	h (m)	Q (l/s)	h ₁ (m)	Q ₁ (l/s)
Mínimo (2.81)	0.019	2.81	0.10	2.80
Diseño 85% (6.88)	0.034	6.88	0.14	6.86
Medio (12.19)	0.050	12.19	0.18	12.16
Diseño (46.88)	0.123	46.88	0.31	46.80
Máximo (54.06)	0.135	54.06	0.33	54.02

ELABORADO POR: Herrera Diego.

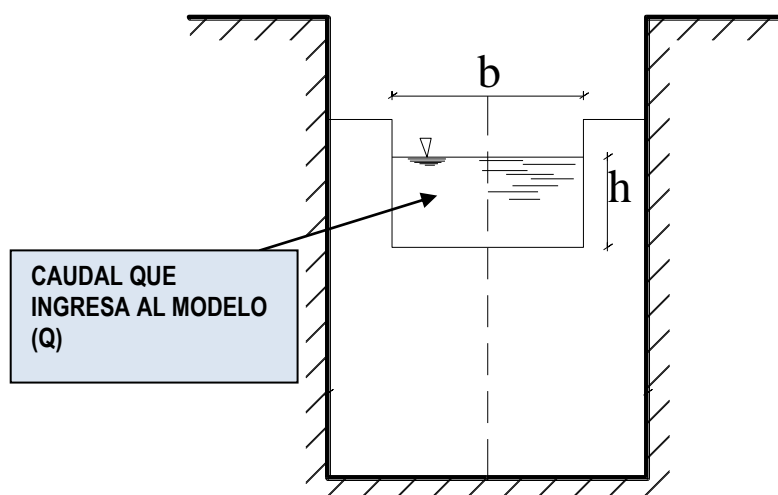


FIGURA 6.16 Vertedero rectangular con contracciones laterales (Elaborado por Herrera Diego)

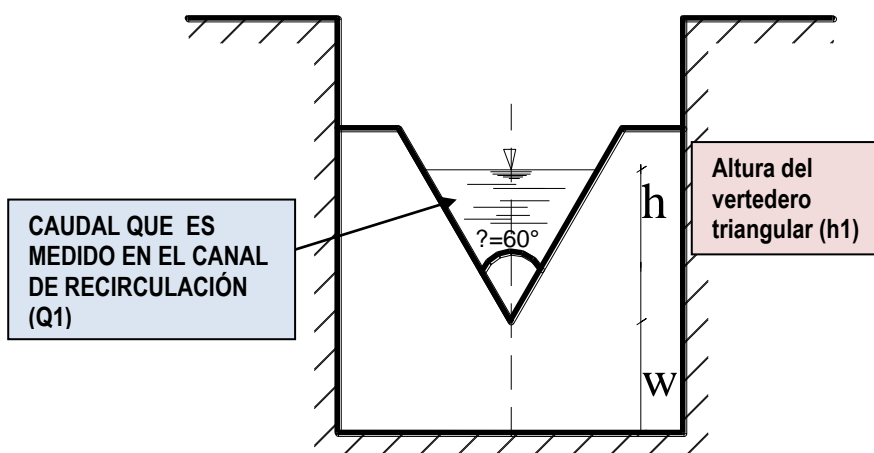


FIGURA 6.17 Vertedero triangular de 60° (Elaborado por Herrera Diego)

Donde:

- h (m) = Altura del vertedero rectangular por donde ingresa el caudal en el modelo
- Q (l/s) = Caudal total que ingresa al modelo
- h_1 (m) = promedio de lecturas tomadas del vertedero triangular en m
- Q_1 (l/s) = Caudal que es medido con el vertedero triangular en el canal de recirculación
- w (m) = Altura del fondo del canal de recirculación a la vértice del vertedero triangular.

Las pérdidas de caudal en el modelo hidráulico fueron mínimas debido a que previa la corrida de pruebas se realizó el sellado de las pequeñas fisuras con impermeabilizantes.

Además las pérdidas se las puede atribuir a pequeñas filtraciones que pudo existir en las uniones entre los distintos elementos que conforman el modelo.

6.4.-COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS DE INCLINACIÓN DE LA REJILLA (FORMULACIÓN DE LOS CRITERIOS DE COMPARACIÓN, ANÁLISIS Y SELECCIÓN)

El presente trabajo de investigación tiene por objeto principalmente encontrar la mayor eficiencia de la rejilla en función del ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, el cual varía entre el 14% al 20% para la obtención de mayor cantidad de caudal, pero de manera didáctica para darnos cuenta cuanto decrece la eficiencia, se tomó un valor extremo fuera del rango (30%).

A continuación se presenta las alternativas en la tabla 6.12

TABLA N° 6.12. Eficiencia de la rejilla

CAUDALES Q (l/s)		Eficiencia de la rejilla %			
		16%	19%	20%	30%
Mínimo	2.81	99.65	98.35	99.76	96.43
Diseño 85%	6.88	99.20	92.79	94.26	85.10
Medio	12.19	90.85	83.48	84.77	78.70
Diseño	46.88	64.96	78.48	79.68	52.74
Máximo	54.06	57.07	75.82	76.97	50.38

ELABORADO POR: Herrera Diego

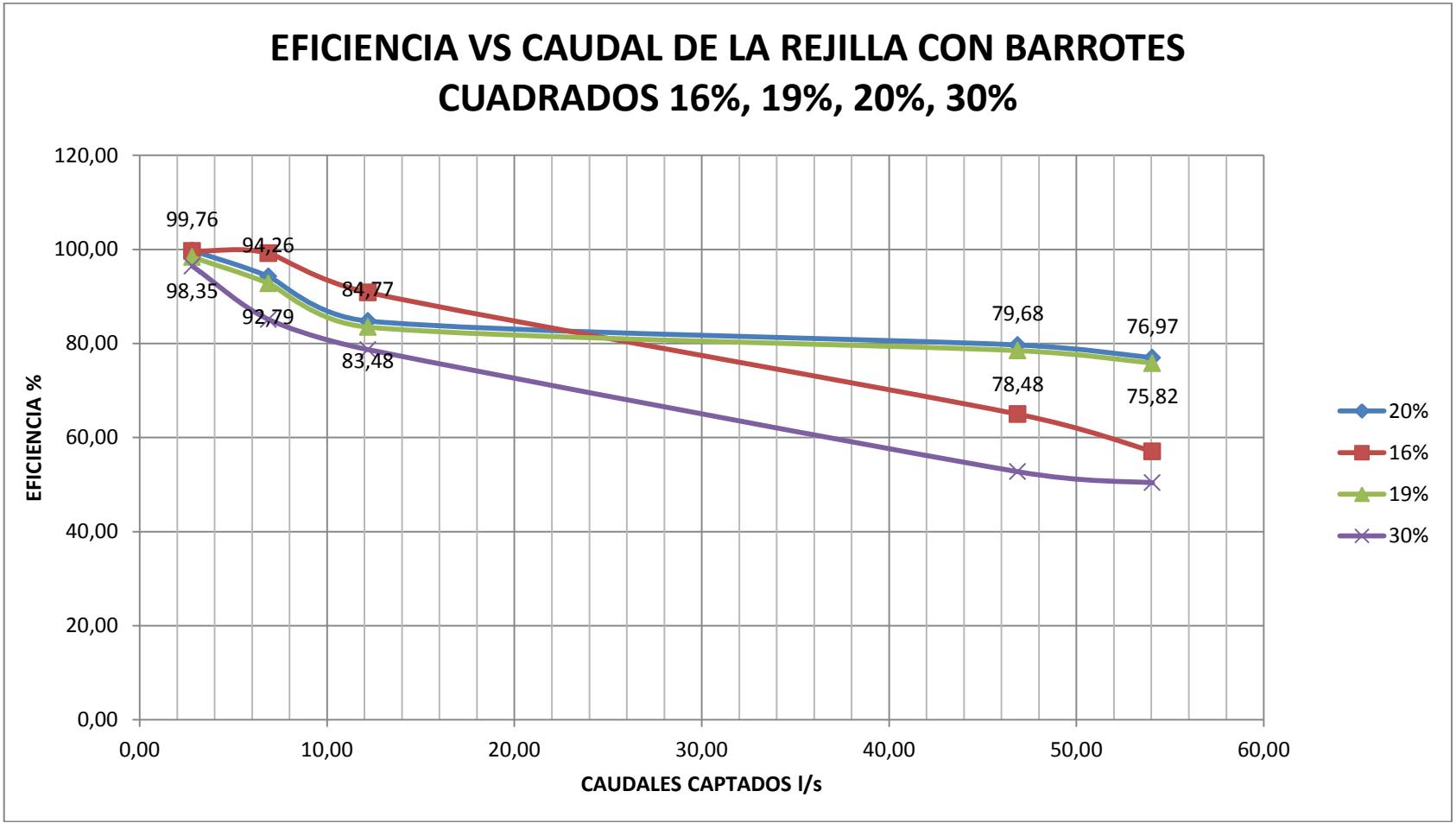


FIGURA 6.18 Eficiencia de la rejilla (Elaborado por Herrera Diego)

De los resultados obtenidos se puede observar que:

- Para caudales pequeños como es, el caudal mínimo, el de diseño recomendado y, el ángulo de inclinación de la rejilla, no tiene mucha incidencia debido a que el agua ingresa en su totalidad a la galería de captación, esto se debe a que la carga de agua sobre la rejilla es pequeña y por lo tanto la velocidad del flujo a la entrada de la rejilla también es baja, por lo que el agua ingresa sin mayor problema a la captación.
- Para caudales mayores como son, el de diseño y el máximo, la inclinación de la rejilla incide como se muestra en los siguientes resultados:

Inclinación del 16%

- ❖ Para el caudal de diseño en modelo: $Q_{\text{diseño}} = 46.88 \text{ l/s}$ y $Q_{\text{diseño}} = 1.50 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, en prototipo, se tiene una eficiencia de 64.96% de la rejilla; es decir, que ésta capta $Q_{\text{captación}}=30.45 \text{ l/s}$.
- ❖ Para el caudal máximo en modelo: $Q_{\text{máximo}} = 54.06 \text{ l/s}$ y $Q_{\text{máximo}} = 1.73 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, se tiene una eficiencia de 57.07% de la rejilla; es decir, que ésta capta $Q_{\text{captación}}=30.85 \text{ l/s}$.

Inclinación del 19%

- ❖ Para el caudal de diseño en modelo: $Q_{\text{diseño}} = 46.88 \text{ l/s}$ y $Q_{\text{diseño}} = 1.50 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, en prototipo, se tiene una eficiencia de 78.48% de la rejilla; es decir, que ésta capta $Q_{\text{captación}}=36.79 \text{ l/s}$.
- ❖ Para el caudal máximo en modelo: $Q_{\text{máximo}} = 54.06 \text{ l/s}$ y $Q_{\text{máximo}} = 1.73 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, en prototipo se tiene una eficiencia de 75.82% de la rejilla; es decir, que ésta capta $Q_{\text{captación}}=40.99 \text{ l/s}$.

Inclinación del 20%

- ❖ Para el caudal de diseño en modelo: $Q_{\text{diseño}} = 46.88 \text{ l/s}$ y $Q_{\text{diseño}} = 1.50 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, en prototipo, se tiene una eficiencia de 79.63% de la rejilla; es decir, que ésta capta $Q_{\text{captación}}=37.33 \text{ l/s}$.

- ❖ Para el caudal máximo en modelo: $Q_{\text{máximo}} = 54.06 \text{ l/s}$ y $Q_{\text{máximo}} = 1.73 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, en prototipo, se tiene una eficiencia de 76.97% de la rejilla; es decir, que ésta capta $Q_{\text{captación}}=41.61 \text{ l/s}$.

Inclinación del 30%

- ❖ Para el caudal de diseño en modelo: $Q_{\text{diseño}} = 46.88 \text{ l/s}$ y $Q_{\text{diseño}} = 1.50 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, en prototipo, se tiene una eficiencia de 52.74% de la rejilla; es decir, que ésta capta $Q_{\text{captación}}=24.72 \text{ l/s}$.
- ❖ Para el caudal máximo en modelo: $Q_{\text{máximo}} = 54.06 \text{ l/s}$ y $Q_{\text{máximo}} = 1.73 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, en prototipo, se tiene una eficiencia de 50.38% de la rejilla; es decir, que ésta capta $Q_{\text{captación}}=27.24 \text{ l/s}$.

La reducción de la eficiencia de la rejilla se debe a que a mayores caudales se incrementa la velocidad del flujo, esto hace que el caudal pase sobre la rejilla y capte menos caudal hacia la galería y al desarenador, lo que reduce el caudal de la captación.

- A mayor caudal y poca inclinación, esto quiere decir que la rejilla capta mayor caudal al paso por la misma, aumentando la captación.
- A mayor caudal y gran inclinación, nos indica que el caudal pasa sobre la rejilla y el flujo experimenta un incremento de velocidad debido a la inclinación alta de la rejilla.
- Se observa que con la inclinación del 20% la captación tiene la mejor eficiencia por lo que esta sería la mejor inclinación para la rejilla de una toma de fondo.

6.5.- JUSTIFICACIÓN TÉCNICA DE LA VARIANTE SELECCIONADA

Los estudios experimentales en el laboratorio demostraron que en la determinación del cambio de sección de los barrotes de la rejilla de circulares corrugados a cuadrados lisos, disminuyó la obstrucción de la rejilla por los sedimentos gruesos, ya que la mayoría de éstos pasan directamente sobre la rejilla

y así se capta la mayor cantidad de agua hacia el desarenador, y se obtuvo la mejor inclinación de la rejilla, para obtener la mayor eficiencia de la misma.

La mayor eficiencia de la rejilla para el caudal de diseño se obtuvo con la inclinación del 20%; es decir, el sistema capta la mayor cantidad de caudal con esta variante.

Según los cálculos que se presentan en el dimensionamiento de la rejilla, a mayor inclinación se necesita una mayor longitud de rejilla ya que se produce un decremento en el coeficiente de contracción. La longitud de rejilla necesaria para captar el caudal de diseño $Q=1.5\text{ m}^3/\text{s}$ es $L = 4.75\text{ m}$ en prototipo, caudal de diseño $Q= 46.88\text{ l/s}$, $L = 0.94\text{ m}$ en modelo como se demuestra a continuación.

CÁLCULO DE LA LONGITUD DE LA REJILLA DEL PROTOTIPO

Barrotes de hierro corrugado $\varnothing= 1''$

L =	4.75	m
B =	1	m
Q =	1.5	m^3/s
C =	0.4025	coef. de contracción
f =	0.2	% de obstrucción = 20%
s =	0.05	espacio libre entre barrotes
e =	0.0254	ancho de un barrote
t =	0.0254	altura o espesor de los barrotes
Ho =	0.34	carga de agua (m) para captar Qd
K =	0.531	coef. de obstrucción

$$C = C_0 - 0,325 i$$

i = ángulo de inclinación rejilla con la horizontal (en este caso 11.3°)

$$i = (\tan(11,3^\circ)) = \mathbf{0.3000}$$

$$0,325 i = 0.0975$$

$$e/s = 0.508 < 4$$

$$C_0 = 0.5$$

$$C = 0,5 - 0,325 \tan 11.3^\circ = 0.4025$$

$$K = (1-f) * s / (s+t) = 0.53050398$$

$$L = Q / [3,195*(K*C*B)^{3/2}] = \mathbf{4.75\text{ m}}$$

Donde:

Cálculo del coeficiente de obstrucción:

$$K = (1 - f) * \frac{s}{s + t}$$

$$K = (1 - 0.20) * \frac{0.05}{0.05 + 0.0254}$$

$$K = 0.531$$

Cálculo del coeficiente de contracción:

$$C = C_0 - 0.325 * i$$

$$C = 0.5 - 0.325 * (\tan 11.3 * 3.1416 / 180)$$

$$C = 0.4025$$

Cálculo de la longitud de la rejilla:

$$L = \frac{Q}{3.195 * (K * C * B)^{3/2}}$$

$$1.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L = \frac{1.5}{3.195 * (0.531 * 0.4025 * 1\text{m})^{3/2}}$$

$$L = 4.75\text{m}$$

CÁLCULO DE LA LONGITUD DE LA REJILLA DEL MODELO CON BARROTES CIRCULARES CORRUGADOS

Barrotes de hierro corrugado $\varnothing = 6 \text{ mm}$

L =	0.94	m
B =	0.32	m
Q =	0.0468	m^3/s
C =	0.4025	coef. de contracción
f =	0.2	% de obstrucción = 20%
s =	0.012	espacio libre entre barrotes
e =	0.006	ancho de un barrote
t =	0.006	altura o espesor de los barrotes
Ho =	0.10	carga de agua (m) para captar Qd
K =	0.533	coef. de obstrucción

$$C = C_0 - 0.325 i$$

i = ángulo de inclinación rejilla con la horizontal (en este caso 11.3°)

$$i = (\tan(11.3 * 3.14 / 180)) \quad \mathbf{0.3000}$$

$$0.325 i = \quad 0.0975$$

$$e/s = 0.5 < 4$$

$$C_0 = 0.5$$

$$C = 0.5 - 0.325 \tan 11.3^\circ = 0.4025$$

$$K = (1-f) * s / (s+t) = 0.53050398$$

$$L = Q / [3.195 * (K * C * B)^{3/2}] = \mathbf{0.94 \text{ m}}$$

CÁLCULO DE LA LONGITUD DE LA REJILLA DEL MODELO CON BARROTES CUADRADOS LISOS

Barrotes de hierro cuadrado liso $l = 8 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} L &= 0.94 \text{ m} \\ B &= 0.32 \text{ m} \\ Q &= 0.0468 \text{ m}^3/\text{s} \\ C &= 0.4025 \text{ coef. de contracción} \\ f &= 0.2 \text{ \% de obstrucción} = 20\% \\ s &= 0.012 \text{ espacio libre entre barrotes} \\ e &= 0.008 \text{ ancho de un barrote} \\ t &= 0.008 \text{ altura o espesor de los barrotes} \\ H_o &= 0.10 \text{ carga de agua (m) para captar } Q_d \\ K &= 0.48 \text{ coef. de obstrucción} \end{aligned}$$

$$C = C_o - 0.325 i$$

$i =$ ángulo de inclinación rejilla con la horizontal (en este caso 11.3°)

$$i = (\tan(11.3^\circ) \cdot 3.14/180) \quad \mathbf{0.3000}$$

$$0.325 i = 0.0975$$

$$e/s = 0.667 < 4$$

$$C_o = 0.5$$

$$C = 0.5 - 0.325 \tan 11.3^\circ = 0.4025$$

$$K = (1-f) \cdot s / (s+t) = 0.48$$

$$L = Q / [3.195 \cdot (K \cdot C \cdot B)^{3/2}] = \mathbf{0.95 \text{ m}}$$

Donde:

Cálculo del coeficiente de obstrucción:

$$K = (1 - f) \cdot \frac{s}{s + t}$$

$$K = (1 - 0.20) \cdot \frac{0.0012}{0.0012 + 0.008}$$

$$K = 0.48$$

Cálculo del coeficiente de contracción:

$$C = C_o - 0.325 \cdot i$$

$$C = 0.5 - 0.325 \cdot (\tan 11.3^\circ \cdot 3.1416/180)$$

$$C = 0.4025$$

Cálculo de la longitud de la rejilla:

$$L = \frac{Q}{3.195 \cdot (K \cdot C \cdot B)^{3/2}}$$

$$L = \frac{0.04688 \text{ m}^3/\text{s}}{3.195 * (0.48 * 0.4025 * 0.32\text{m})^{3/2}}$$

$$L = 0.95\text{m}$$

6.6.- ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA TOMA CON SEDIMENTOS

Una vez concluidas las corridas en modelo y seleccionada la mejor variante (20%) se realizaron pruebas en el modelo con sedimentos, para observar el comportamiento de la rejilla con barrotes cuadrados lisos, el resultado es que gran cantidad de los sedimentos que pasen del canal del desripador pasan sobre la rejilla y no obstruye, como es el caso de la investigación anterior que el barrote fue de sección circular y corrugado.

El flujo puede transportar materiales tales como sedimentos de fondo, sedimentos en suspensión o ambos. Los sedimentos de fondo se refieren al material que salta, rueda o rebota a lo largo del cauce, los sedimentos en suspensión son las partículas que se encuentran flotando en el agua viajando a la velocidad de la misma.

El objetivo de la rejilla es captar la mayor cantidad de agua con la menor cantidad de sedimentos; habrá obstrucción principalmente en crecidas.

Además, este tipo de obras al estar ubicadas en zonas de difícil acceso, en el diseño se deben considerar la ubicación de la toma, ya que el río Arturo tiene arrastre de sedimentos, para que éstos no generen mayores problemas con la obstrucción de la rejilla y así disminuir el mantenimiento de la misma.

Las pruebas se realizaron con sedimentos, los cuáles se los clasificó con de tamices, luego se los pintó de varios colores para diferenciar su granulometría y poder identificar su comportamiento cualitativo en las pruebas.

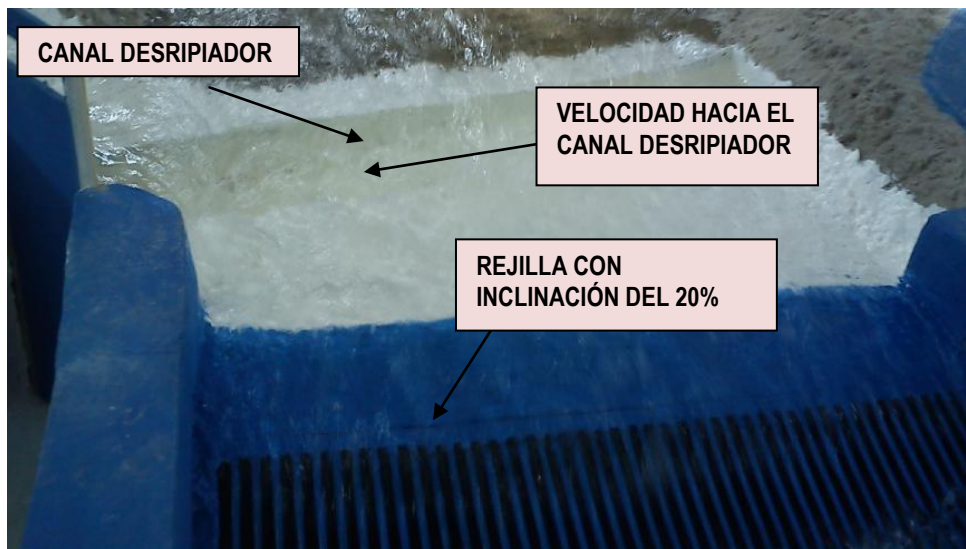
Como se indica en la siguiente tabla los sedimentos que capta la rejilla del modelo son de diámetros menores a 5mm, los cuales pasa el tamiz #4 y #8, con sedimentos pintados de color azul y rojo respectivamente.

TABLA N° 6.13. Clasificación de sedimentos

DESCRIPCIÓN	DIÁMETRO MODELO	DIÁMETRO PROTOTIPO	OBSERVACIONES
	mm	mm	
TAMIZ # 1	25	100	COLOR AMARILLO
TAMIZ # 3/8	10	40	COLOR VERDE
TAMIZ # 4	5	20	COLOR AZUL
TAMIZ # 8	2.36	9.44	COLOR ROJO
ARENA	0.6 - 2		ARENA

ELABORADO POR: Herrera Diego.

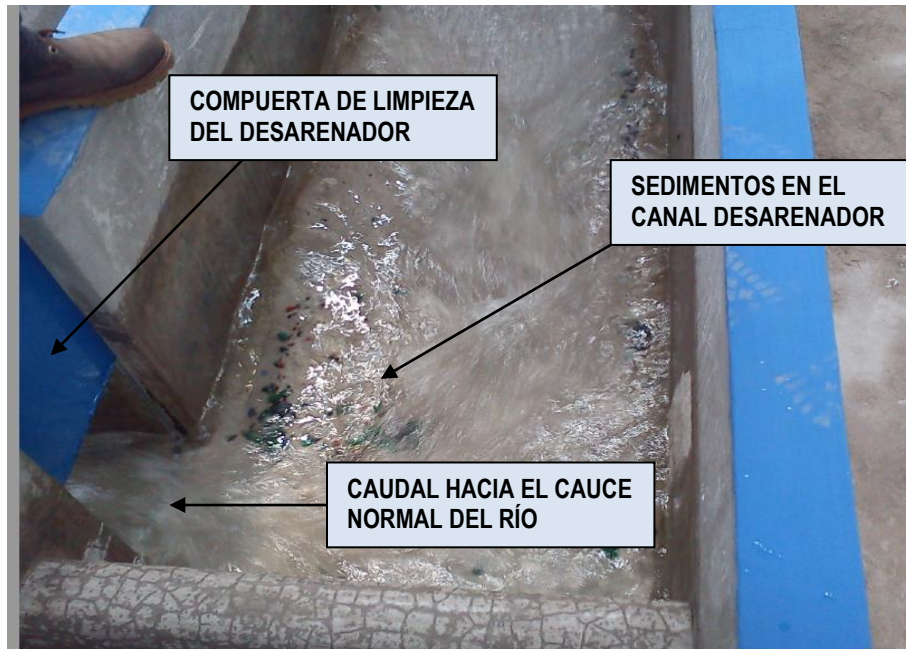
La corrida de pruebas con sedimentos, consistió en agregar los sólidos al curso de agua, con los diferentes caudales con los que se realizó las pruebas para la tercera variante (20% de inclinación de la rejilla) estos son: caudal máximo, $Q_{máx_p}=1.73 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{máx_m}=54.06 \text{ l/s}$, Caudal Medio $Q_{med_p} = 0.39 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{med_m}=12.19 \text{ l/s}$, Caudal Mínimo $Q_{mín_p}=0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{mín_m}=2.81 \text{ l/s}$, Caudal de Diseño $Q_{dis_p}=1.5\text{m}^3/\text{s}$ y $Q_{dis_m}=46.88 \text{ l/s}$, Caudal de Diseño recomendado 85% para riego $Q_{dis85\%_p}=0.22\text{m}^3/\text{s}$ y $Q_{dis85\%_m}=6.88 \text{ l/s}$. Se observó que los sedimentos de color rojo y azul (menores a 0.5 cm), pasaron por la rejilla hacia la galería y luego hacia el desarenador



Fotografía 6.5. Funcionamiento de la rejilla y canal del desripador (tomado por Herrera Diego)

Caudal de diseño recomendado 85% para riego $Q_{dis85\%_p}=0.22\text{m}^3/\text{s}$ y $Q_{dis85\%_m}=6.88\text{ l/s}$:

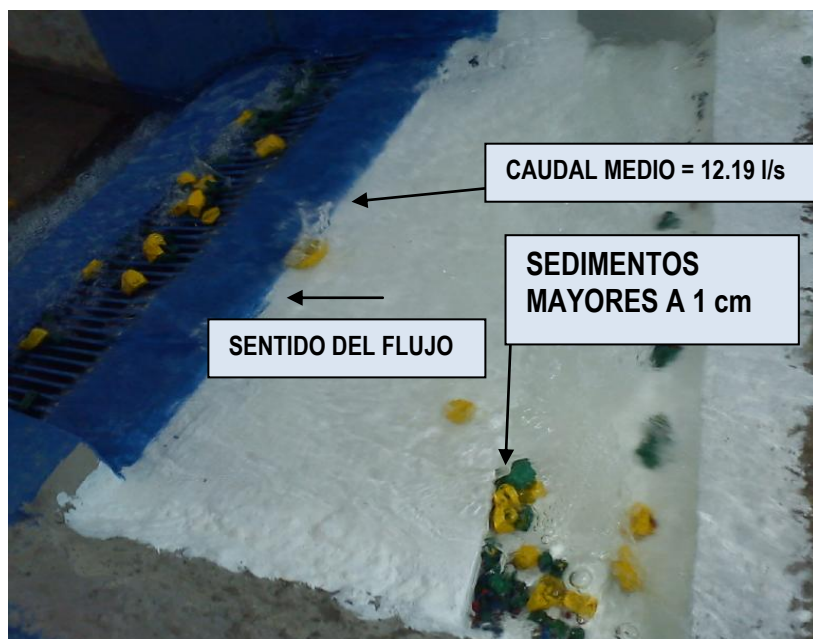
En las fotografías 6.5 y 6.6 se puede apreciar el funcionamiento de la rejilla y de los sedimentos con el caudal de diseño recomendado.



Fotografía 6.6. Compuerta del desarenador con sedimentos (tomado por: Herrera Diego)

Caudal medio $Q_{med_p} = 0.39\text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{med_m}=12.19\text{ l/s}$:

En la fotografía 6.10 se puede apreciar el funcionamiento de la rejilla y de los sedimentos con el caudal medio.



Fotografía 6.7. Funcionamiento de la rejilla con sedimentos (tomado por Herrera Diego)

Caudal de diseño $Q_{dis_p}=1.5m^3/s$ y $Q_{dis_m}=46.88$ lts/s:

En la fotografía 6.11 se puede apreciar el funcionamiento de la rejilla y de los sedimentos con el caudal de diseño.

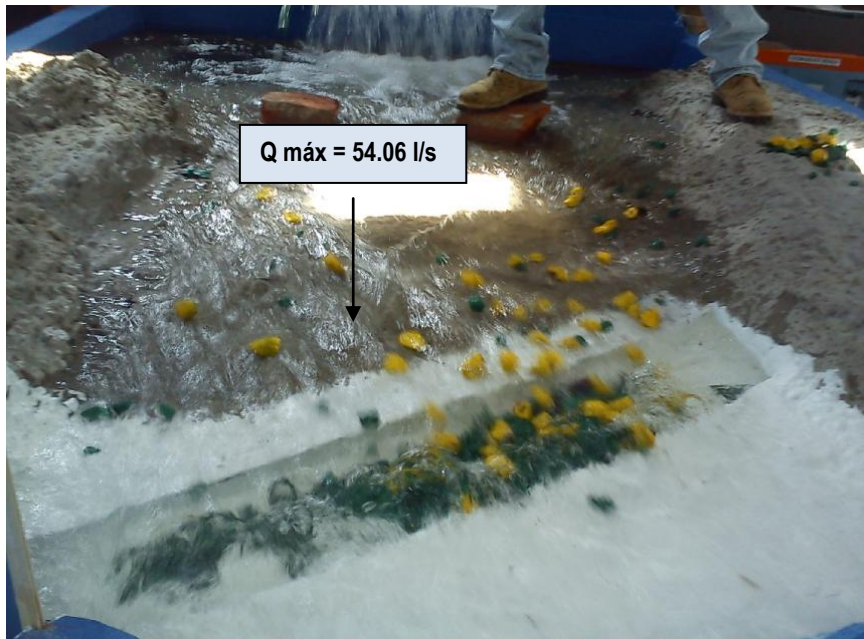


Fotografía 6.8. Sedimentos retenidos en el canal desripiador (tomado por Herrera Diego)



Fotografía 6.9. Canal de transición (tomado por: Herrera Diego)

Caudal máximo, $Q_{\text{máx}_p}=1.73 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{\text{máx}_m}=54.06 \text{ l/s}$:



Fotografía 6.10. Funcionamiento de la rejilla con caudal máximo (tomado por: Herrera Diego)



Fotografía 6.11. Funcionamiento del canal de recirculación (tomado por: Herrera Diego)

6.7.- RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS EN EL MODELO CON SEDIMENTOS

En la siguiente tabla se muestra el cálculo de la eficiencia, tomado de la diferencia de caudales entre el vertedero triangular ubicado en el canal de recirculación y el vertedero rectangular con contracciones laterales ubicado al inicio del tramo de la simulación del río.

TABLA N° 6.14. Cálculo de la eficiencia de la rejilla con una inclinación del 20% con sedimentos

CAUDALES	Vertedero Rectangular ingreso al modelo		Vertedero a la salida del modelo			Diferencia de caudales	Eficiencia
	h (m)	Q (l/s)	L (m)	h ₁ (m)	Q ₁ (l/s)	Q ₂ (l/s)	Δ %
Mínimo	0.019	2.81	0.75	0.01	2.52	0.30	89.50
Diseño 85%	0.034	6.88	0.75	0.02	5.76	1.11	83.85
Medio	0.050	12.19	0.75	0.03	8.58	3.61	70.36
Diseño	0.123	46.88	0.75	0.06	26.26	20.61	56.03
Máximo	0.135	54.06	0.75	0.07	27.27	26.79	50.45

ELABORADO POR: Herrera Diego.

En la siguiente figura se muestra el vertedero rectangular con contracciones laterales, el ingreso del caudal hacia el modelo.

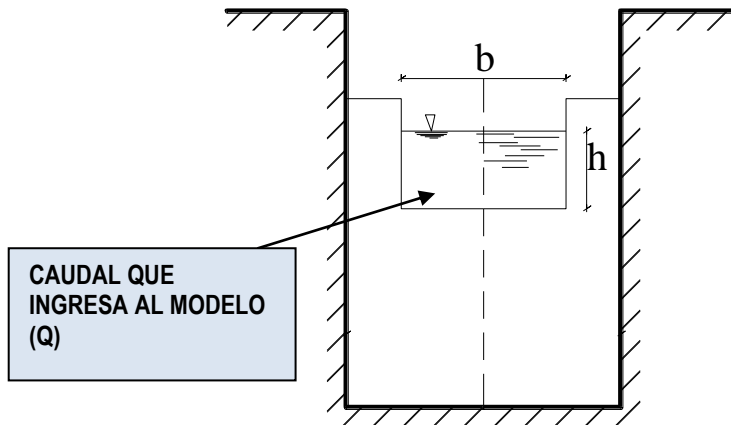


FIGURA 6.19 Vertedero rectangular con contracciones laterales (Elaborado por Herrera Diego)

En la siguiente figura se muestra el vertedero de pared delgada con borde circular, el ingreso del caudal del canal desarenador por sobre su cresta hacia la conducción.

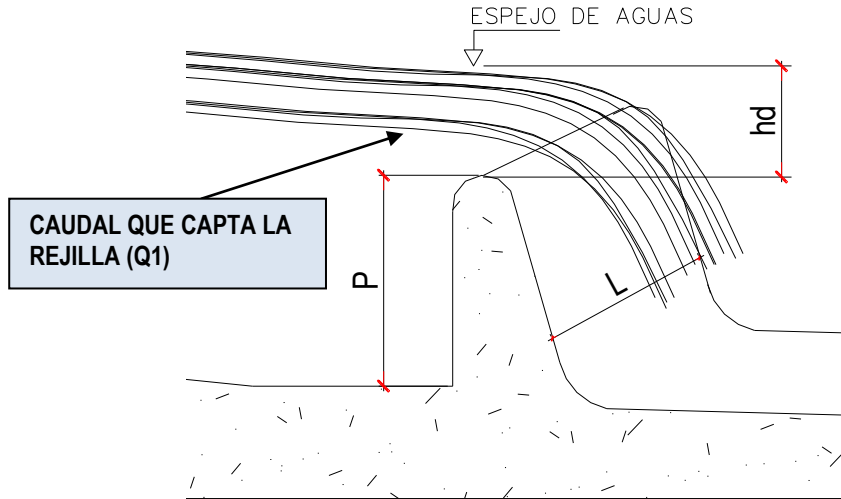


FIGURA 6.20 Vertedero de pared delgada con borde circular (Elaborado por Herrera Diego)

Donde:

- h (m) = Carga sobre el vertedero rectangular por donde ingresa el caudal en el modelo
- Q (l/s) = Caudal total que ingresa al modelo
- L (m) = longitud del vertedero de pared delgada con borde circular
- Q_1 (l/s) = Caudal que se capta en la rejilla
- h_1 (m) = promedio de lecturas tomadas en m
- Q_2 (l/s) = caudal que no se capta
- Δ (%) = Eficiencia

A continuación en la tabla 6.15 se presenta la comparación de los resultados obtenidos en las eficiencias del funcionamiento de la rejilla con sedimentos y sin ellos.

TABLA N° 6.15. Comparación de eficiencias con y sin sedimentos

CAUDALES Q (l/s)		Eficiencia en porcentaje para inclinación de la rejilla del 20%	
		Sin sedimentos	Con sedimentos
Mínimo	2.81	99.76	89.50
Diseño 85%	6.88	94.26	83.85
Medio	12.19	84.77	70.36
Diseño	46.88	79.68	56.03
Máximo	54.06	76.97	50.45

ELABORADO POR: Herrera Diego.

En la tabla superior se observa que la eficiencia del caudal de diseño tiene un decrecimiento del 23% con respecto a la eficiencia de la rejilla tomada sin sedimentos, esto quiere decir que los sedimentos obstruyen la captación adecuada de la rejilla.

Pero en comparación al diseño anterior del modelo con una inclinación de rejilla del 19% y con barrotos circulares corrugados, la disminución de la eficiencia fue del 30% en el caudal del diseño.

En la siguiente figura se muestra la gráfica de la eficiencia de la rejilla con el 20% de inclinación con sedimentos y sin ellos.

Eficiencia de la rejilla, inclinación 20%, con y sin sedimentos

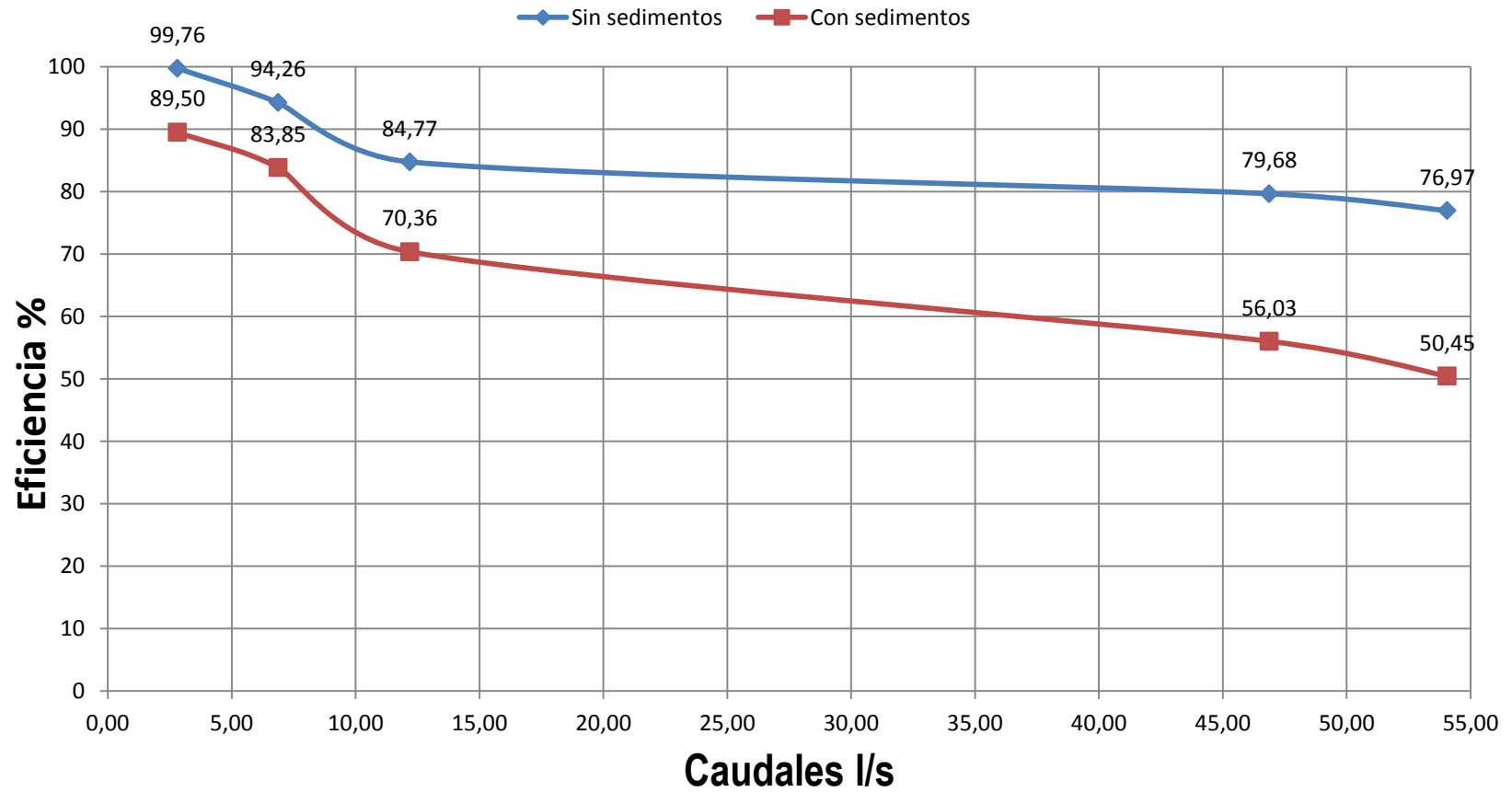


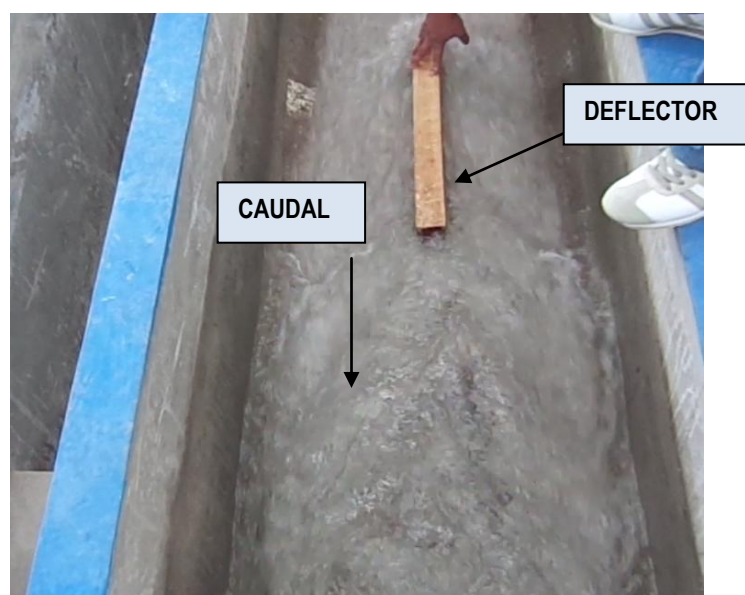
FIGURA 6.21 Eficiencia de la rejilla con y sin sedimentos (inclinación 20%)

De los resultados obtenidos se puede concluir que la eficiencia de la rejilla baja significativamente al añadir sedimentos en el cauce.

Con caudales pequeños la reducción de la eficiencia de la rejilla con sedimentos respecto a sin sedimentos está alrededor del 10% – 14%, para caudales mayores como el de diseño, la eficiencia con sedimentos baja respecto a sin sedimentos en un 23% esto se debe a que con grandes caudales la obstrucción de la rejilla es mayor ya que por la velocidad de aproximación, el cauce tendrá gran cantidad de material de arrastre.

El desarenador presenta un correcto funcionamiento ya que las partículas son dirigidas hacia el fondo del mismo con caudales grandes y pequeños pese a que con caudales grandes se forman turbulencias y remolinos los sedimentos tienden a irse al fondo por el cambio de pendiente del 5% al 3% y a la gran profundidad del desarenador.

Al momento de abrir la compuerta de limpieza no todos los sedimentos son evacuados el cual hace difícil la limpieza del canal sedimentador, pudiendo solucionar esto con una estructura llamada deflector al inicio del canal, el cual hace que el caudal del canal se divida en dos partes iguales, y pueda limpiar con facilidad los sólidos asentados en el fondo.



Fotografía 6.12. Colocación del deflector para eliminar sedimentos (tomado por: Herrera Diego)

Capítulo VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1.- CONCLUSIONES

Se concluye que la mejor inclinación de la rejilla esta alrededor del 20% comprobando de esta manera con los estudios realizados anteriormente en el modelo.

Podemos concluir que con la experiencia práctica y constructiva del estudio experimental en modelo hidráulico del flujo en una toma de fondo tipo caucasiana, la inclinación de la rejilla tiene incidencia en la captación por los resultados obtenidos anteriormente.

A comparación del diseño original con una inclinación del 19% y rejilla con barrotes circulares corrugados con el caudal de diseño la eficiencia de la rejilla fue de 76.30%, el rediseño con barrotes cuadrados lisos con la misma inclinación se obtuvo una eficiencia de 78.50%, lo cual se concluye que aumentó la captación en un 2.20%, esto quiere decir 1.05 l/s en modelo y 0.038 m^3/s en prototipo, esto quiere decir que la forma de los barrotes tiene incidencia en la captación por la retención de sólidos en la rejilla.

De los cálculos obtenidos acoplado al modelo una inclinación de rejilla del 20% se obtuvo, que para el caudal de diseño la eficiencia fue la más alta con un valor de 79.70%, lo que quiere decir que comparando con el diseño original la eficiencia aumentó en un 3.40%, siendo 1.60 l/s en modelo y 0.055 m^3/s en prototipo, por lo que la inclinación obtenida en ésta investigación es la mejor comparada con el diseño anterior.

El criterio de la escala escogida para la modificación del modelo hidráulico fue 1:04 debido a que es la que se tomó en la construcción inicial del modelo ya que cumple con las mejores condiciones de trabajo y en comparación al prototipo es la que más se ajusta, obteniendo así la escala geométrica y de caudales.

En la modificación del modelo hidráulico físico se realizó una simulación similar de los caudales del río Arturo, para evitar que los resultados sean erróneos y éstos concuerden con los del prototipo al momento de ser representados no existan pérdidas y así obtener la eficiencia más alta.

Se realizó la modelación de un tramo del río Arturo al que se le proporciono similares condiciones del cauce natural actual como son la pendiente y las dimensiones del sitio donde se está implantando la toma real, tomando en cuenta la escala obtenida, para la modificación del modelo en el laboratorio.

Al modificar el diseño de la rejilla se captó mayor caudal del río Arturo, evitó la obstrucción de la rejilla con sedimentos, por ser los barrotes lisos y su sección transversal cuadrada.

Debido a la modelación hidráulica realizada se pudo modificar el canal desarenador que permite mejorar la funcionalidad y la conservación de las diferentes estructuras hidráulicas.

Por la reducción de la pendiente longitudinal del desarenador concluimos que las partículas se sedimentaron en un 6% más que con el diseño anterior, pero la limpieza de éstos al momento de elevar la compuerta no fue eficiente, ya que el canal de limpieza es perpendicular al canal del desarenador, disminuyendo la velocidad de salida hacia el canal.

Dado que el modelo físico cumple con las condiciones de similitud geométrica y dinámica planteadas como base de la investigación, los resultados obtenidos y el análisis de las mediciones en el modelo son valederas para el prototipo en el modelo hidráulico físico reducido del flujo en una toma de fondo tipo caucasiona o tirolesa del sistema de riego Cayambe - Tabacundo del río Arturo.

La modelación hidráulica facilita las soluciones a problemas hidráulicos que ocurren en el proceso constructivo, generando soluciones por los investigadores en afán de encontrar la mejor alternativa sea esta técnica y económica.

7.2.- RECOMENDACIONES

Dar una suficiente inclinación al canal de lavado del desarenador para eliminar la mayor cantidad de sedimentos al momento de hacer la limpieza del canal y el diseño de la geometría y orientación del canal de limpieza del desarenador, debería ser modificado de tal forma que la pendiente aumente ya que al abrir la compuerta el caudal se integre nuevamente al curso del río con una velocidad similar a la del cauce lo cual no sucede, al momento de elevar la compuerta el agua es expulsada con tal fuerza ya que el canal de limpieza se encuentra ubicado de forma perpendicular al canal del desarenador, lo que puede modificar el cauce del río o en peores casos destruir la estructura por motivos de socavación.

Inspeccionar el proceso constructivo del desarenador ya que errores pequeños pueden alterar el porcentaje de sólidos en suspensión y aumentar velocidades en el canal de transición al ingreso al canal sedimentador.

Es muy importante la estabilización de taludes aguas arriba del sitio de implantación de la toma en el río Arturo, para que en crecidas, éstas detengan el material de arrastre que por las condiciones propias de un río de montaña.

Se recomienda dar una pendiente transversal hacia los lados del canal a lo largo del canal sedimentador, siendo ésta la mínima que es del 2% para evitar la acumulación de sólidos en el centro del canal al momento de la limpieza.

Tener mucha precaución al tomar las mediciones con los aparatos para evitar errores en los resultados del modelo, que transformados a la escala real del prototipo pueden ser muy representativos.

Recomendar también el uso de impermeabilizantes en uniones de la estructura, ya que evitó las filtraciones en las mismas, para tratar de evitar alteraciones en los resultados como son la disminución de caudales en los vertederos para la obtención de la eficiencia.

Para el análisis de sólidos en suspensión se recomienda ampliación la escala del modelo ya que las pruebas realizadas fueron de carácter cualitativos y no cuantitativos, por la difícil simulación del tamaño de los sedimentos (rocas pintadas).

Fomentar más investigaciones en modelos hidráulicos, para ayudar a mejorar el conocimiento de los estudiantes de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática.

BIBLIOGRAFÍA

1. CHOW, Ven te. Hidráulica de canales abiertos, Editorial Diana, México, 1era edición, Junio 1982.
2. CORCHO ROMERO, Freddy y DUQUE SERNA, José. Acueductos teoría y diseño, Universidad de Medellín, segunda reimpresión, mayo 2009 (capítulo 2)
3. GOBIERNO DE LA PROVINCIA DE PICHINCHA, Estudios hidrológicos complementarios de las cuencas de los ríos que aportan para el proyecto de riego Cayambe - Tabacundo, Estudio Hidrológico Tomo I.
4. GOBIERNO DE LA PROVINCIA DE PICHINCHA, Estudios hidrológicos complementarios de las cuencas de los ríos que aportan para el proyecto de riego Cayambe - Tabacundo, Diseños Hidráulicos Definitivos, Toma Caucasiona.
5. HIDALGO, Marcelo. Introducción a la teoría de modelos Hidráulicos y aplicaciones básicas, Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Hidráulica.
6. KROCHIN, Sviatoslav. Diseño Hidráulico, Tercera Edición octubre 2010, impreso en Editorial de la Universidad Técnica Particular de Loja.
7. NARVÁEZ, Mayra y PÉREZ, Luis. Estudio en el modelo hidráulico físico del flujo en una toma de fondo tipo caucasiona o tirolesa (tesis).
8. RECURSOS HIDRÁULICOS USA, Diseño de Presas Pequeñas, Decima primera impresión, Julio 1982, (pág 189).
9. ROCHA, FELICES Arturo. Hidráulica de Tuberías y Canales.

10. SOTELO, Gilberto. Hidráulica General, Vol. I, Ed. Limusa, México, Decima octava reimpression, 1997, (capítulo 7)
11. VERGARA, Miguel. Técnicas de modelación en Hidráulica, Ediciones Alfaomega s.a 1993, México D.F
12. <http://www.scribd.com>
13. <http://www.scribd.com/doc/116747102/BOCATOMA-TIROLESA>
14. <http://www.wikipedia.com>
15. <http://www.monografias.com>
16. <http://www.wikipedia.com>
17. <http://www.fagro.com>
18. <http://www.iwr.msu.edu>
19. <http://ingenieriacivilfsa.blogspot.com/2010/07/saltos-de-agua-y-presas-de-embalses.html>
20. <http://ingenieriacivilfsa.blogspot.com/2010/07/saltos-de-agua-y-presas-de-embalses.html>

ANEXOS

ANEXO 1.1

**AUTORIZACIÓN DE OBTENCIÓN DE DATOS PROPORCIONADO POR EL
GOBIERNO PROVINCIAL DE PIGHINCHA, VISITA TÉCNICA Y
AUTORIZACIÓN DE UTILIZACIÓN DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA**

Quito, 31 de Julio del 2012

Sr. Economista
Gustavo Baroja
Prefecto de la Provincia de Pichincha
Presente.-



De mi consideración.

Por medio de la presente, solicito a usted de la manera más comedida, disponer a quien corresponda se me autorice obtener los datos de la Toma de fondo del Río Arturo en virtud de que dichos datos me facilitarán el desarrollo del plan de tesis aprobado y titulado: **“MEJORAMIENTO HIDRAULICO AL DESARENADOR Y REJILLA DE LA TOMA CAUCASIANA DEL MODELO HIDRÁULICO REDUCIDO IMPLEMENTADO EN EL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICA”** de la Universidad Central del Ecuador, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil.

Seguro que la presente tendrá la acogida esperada me despido no sin antes expresarle mis sentimientos de consideración y estima.

Atentamente,

Diego Herrera P.
Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil.
CC. 1716967524.

Quito, 10 de Enero del 2013

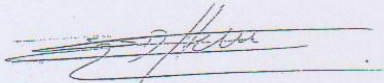
Sr. Licenciado
Luis Jarrin
Director del Área Técnica del Proyecto de Riego Tabacundo
Presente.-

De mi consideración.

Por medio de la presente, solicitamos a usted de la manera más comedida, disponer a quien corresponda se nos autorice realizar una visita técnica y la obtención de los datos al Proyecto de Riego Tabacundo, en la toma de fondo del río Arturo, ya que dicha actividad nos facilitarán el desarrollo de nuestro plan de tesis aprobado por Universidad Central del Ecuador, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil.

Seguro que la presente tendrá la acogida esperada nos despedimos no sin antes expresarle nuestros sentimientos de consideración y estima.

Atentamente,



Diego Herrera P.
Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil.
CC. 1716967524.



Héctor Jiménez.
Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil.
CC. 1720280997.

Bos
10-01-13



Quito, 15 de enero de 2013

Señor

DIEGO HERRERA

Presente

De mi consideración:

Ante la petición realizada por los señores Héctor Jiménez y usted señor Herrera, me permito indicar que ésta Unidad ha aceptado su petición y por lo tanto el recorrido al Proyecto de Riego Cayambe Pedro Moncayo se lo realizará mañana 16 de enero de 2012, lugar de salida Edificio del Gobierno Autónomo Descentralizado de Pichincha, ubicado en la Manuel Larrea N 13-45 y Antonio Ante, a las 07H00, en el vehículo N° 03-420, conducido por el señor René Pastuña, Chofer de ésta Unidad, acompañados por el suscrito, Técnico Coordinador del Proyecto.

Es oportuna la ocasión para expresa mi consideración y estima.

Atentamente,

ING. FRANKLIN BURBANO

Técnico Coordinador Proyecto Tabacundo

Quito, 25 de Enero del 2013.

Señor Ingeniero:

SALOMÓN JAYA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

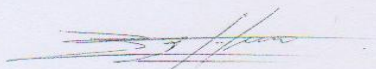
Presente

Señor Director:

Nosotros, Diego Isaías Herrera Palacios y Héctor Lenin Jiménez Guato, estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERIA CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICA, ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL, solicitamos se nos autorice el uso del espacio físico necesario en el laboratorio de hidráulica para la modificación e implantación del desripiador del modelo hidráulico de una toma de fondo, mismo que servirá para poder seguir desarrollando nuestro tema de tesis y a la par contribuir con la mejor comprensión en el laboratorio, por parte de los estudiantes, del funcionamiento de este tipo de obra hidráulica.

Por la atención que le brinde a la presente le anticipamos nuestros agradecimientos.

Atentamente:



Diego Herrera

171696752-4



Héctor Jiménez

172028099-7

*Dejando en
hacer uso del
laboratorio en
horas laborales
a 25/1/2013*

ANEXO 3.1

CAUDALES MENSUALES GENERADOS (1965-2005)

Caudales Medios Mensuales Historicos (m ³ /s)													
Arturo AJ Azuela													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Medio
1965	0.19	0.16	0.17	0.27	0.45	0.69	0.54	0.51	0.40	0.34	0.44	0.46	0.39
1966	0.39	0.38	0.64	0.50	0.32	0.34	0.44	0.53	0.46	0.40	0.26	0.37	0.42
1967	0.39	0.44	0.36	0.35	0.33	0.69	0.72	0.67	0.38	0.34	0.32	0.28	0.44
1968	0.26	0.25	0.33	0.43	0.37	0.55	0.79	0.47	0.28	0.40	0.28	0.25	0.39
1969	0.28	0.34	0.31	0.56	0.57	0.64	0.59	0.68	0.41	0.40	0.36	0.40	0.46
1970	0.49	0.70	0.57	0.57	0.66	0.84	0.41	0.70	0.58	0.41	0.52	0.38	0.57
1971	0.16	0.18	0.17	0.21	0.18	0.49	0.66	0.59	0.68	0.82	0.65	0.58	0.45
1972	0.66	0.60	0.70	0.76	0.81	1.08	1.32	0.74	0.50	0.39	0.49	0.61	0.72
1973	0.55	0.40	0.40	0.35	0.70	0.58	0.44	0.38	0.31	0.28	0.26	0.58	0.44
1974	0.56	0.57	0.56	0.54	0.57	0.63	0.59	0.36	0.26	0.26	0.24	0.34	0.46
1975	0.62	0.56	0.48	0.37	0.34	0.54	0.25	0.22	0.19	0.19	0.15	0.14	0.34
1976	0.36	0.27	0.24	0.26	0.62	0.72	1.10	0.47	0.31	0.31	0.34	0.30	0.44
1977	0.20	0.35	0.41	0.39	0.33	0.41	0.57	0.40	0.35	0.35	0.26	0.26	0.36
1978	0.25	0.37	0.47	0.36	0.34	0.31	0.31	0.24	0.23	0.23	0.11	0.13	0.28
1979	0.09	0.09	0.21	0.33	0.27	0.36	0.38	0.30	0.27	0.27	0.27	0.29	0.26
1980	0.24	0.28	0.50	0.63	0.64	0.84	0.64	0.47	0.36	0.36	0.27	0.23	0.46
1981	0.22	0.22	0.26	0.23	0.24	0.33	0.64	0.22	0.23	0.19	0.16	0.30	0.27
1982	0.25	0.22	0.21	0.39	0.50	0.59	0.47	0.56	0.46	0.54	0.35	0.66	0.43
1983	0.39	0.41	0.61	0.58	0.69	0.48	0.32	0.28	0.29	0.29	0.20	0.26	0.40
1984	0.27	0.34	0.45	0.49	0.36	0.49	0.38	0.28	0.40	0.30	0.22	0.33	0.36
1985	0.22	0.22	0.27	0.23	0.49	0.73	1.01	0.47	0.28	0.13	0.20	0.20	0.37
1986	0.19	0.16	0.36	0.37	0.37	0.45	0.45	0.26	0.29	0.26	0.24	0.26	0.31
1987	0.20	0.41	0.33	0.37	0.52	0.33	0.29	0.26	0.23	0.32	0.18	0.25	0.31
1988	0.20	0.23	0.50	0.32	0.38	0.46	0.68	0.40	0.31	0.40	0.42	0.37	0.39
1989	0.49	0.40	0.54	0.38	0.54	1.17	0.88	0.24	0.20	0.25	0.16	0.20	0.45
1990	0.20	0.21	0.25	0.26	0.48	0.61	0.40	0.34	0.38	0.34	0.26	0.22	0.33
1991	0.29	0.25	0.34	0.36	0.39	0.50	1.24	0.55	0.35	0.28	0.25	0.33	0.43
1992	0.23	0.23	0.25	0.45	0.25	0.96	0.81	0.42	0.30	0.29	0.21	0.25	0.39
1993	0.30	0.29	0.47	0.41	0.39	0.50	0.46	0.26	0.18	0.20	0.24	0.24	0.33
1994	0.26	0.21	0.23	0.54	0.51	0.84	0.60	0.54	0.39	0.36	0.33	0.61	0.45
1995	0.30	0.28	0.30	0.30	0.32	0.39	0.31	0.19	0.28	0.12	0.10	0.17	0.25
1996	0.20	0.17	0.22	0.25	0.34	0.40	0.37	0.25	0.25	0.16	0.35	0.27	0.27
1997	0.21	0.38	0.27	0.29	0.34	0.39	0.79	0.38	0.39	0.17	0.21	0.23	0.34
1998	0.28	0.33	0.23	0.33	0.53	0.40	0.70	0.34	0.20	0.19	0.26	0.30	0.34
2003	0.25	0.20	0.23	0.30	0.26	0.74	0.79	0.37	0.36	0.31	0.31	0.34	0.37
2004	0.30	0.31	1.73	1.11	1.39	0.55	0.61	0.19	0.27	0.22	0.24	0.34	0.61
2005	0.12	0.27	0.44	0.37	0.48	0.57	0.65	0.41	0.21	0.25	0.15	0.26	0.35
Med	0.30	0.32	0.41	0.41	0.47	0.58	0.61	0.40	0.33	0.31	0.28	0.32	0.39
Max	0.66	0.70	1.73	1.11	1.39	1.17	1.32	0.74	0.68	0.82	0.65	0.66	1.73
Min	0.09	0.09	0.17	0.21	0.18	0.31	0.25	0.19	0.18	0.12	0.10	0.13	0.09

ANEXO 3.2

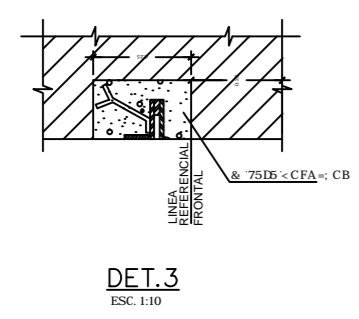
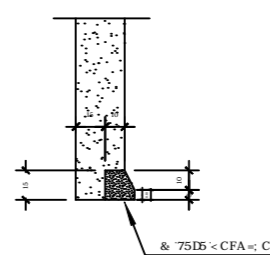
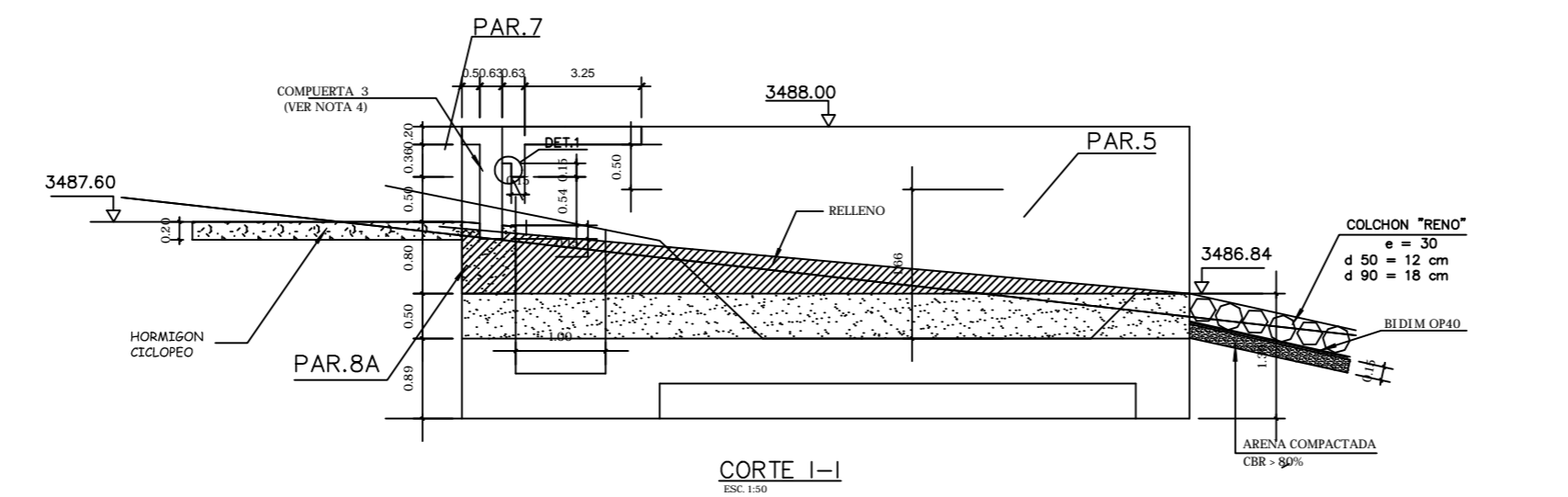
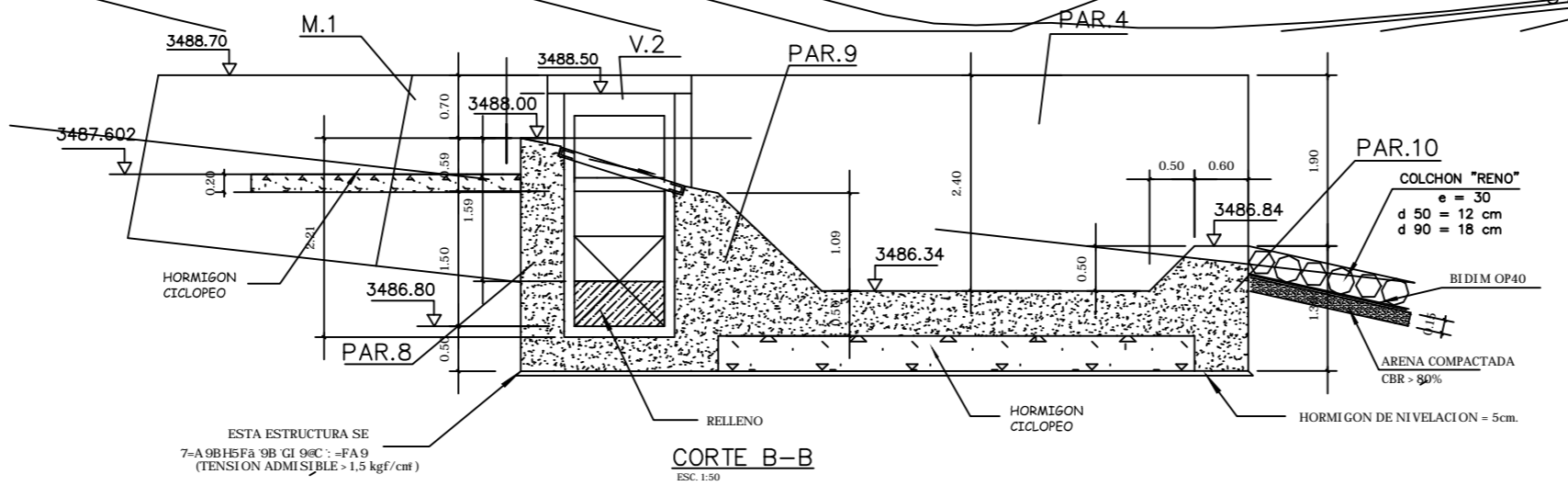
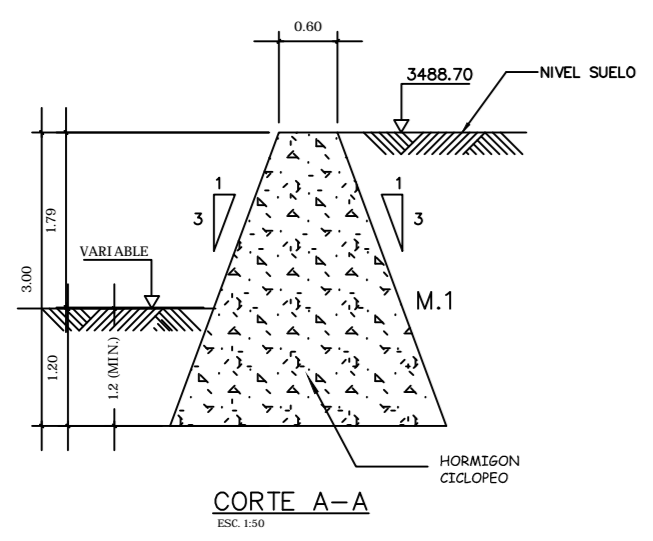
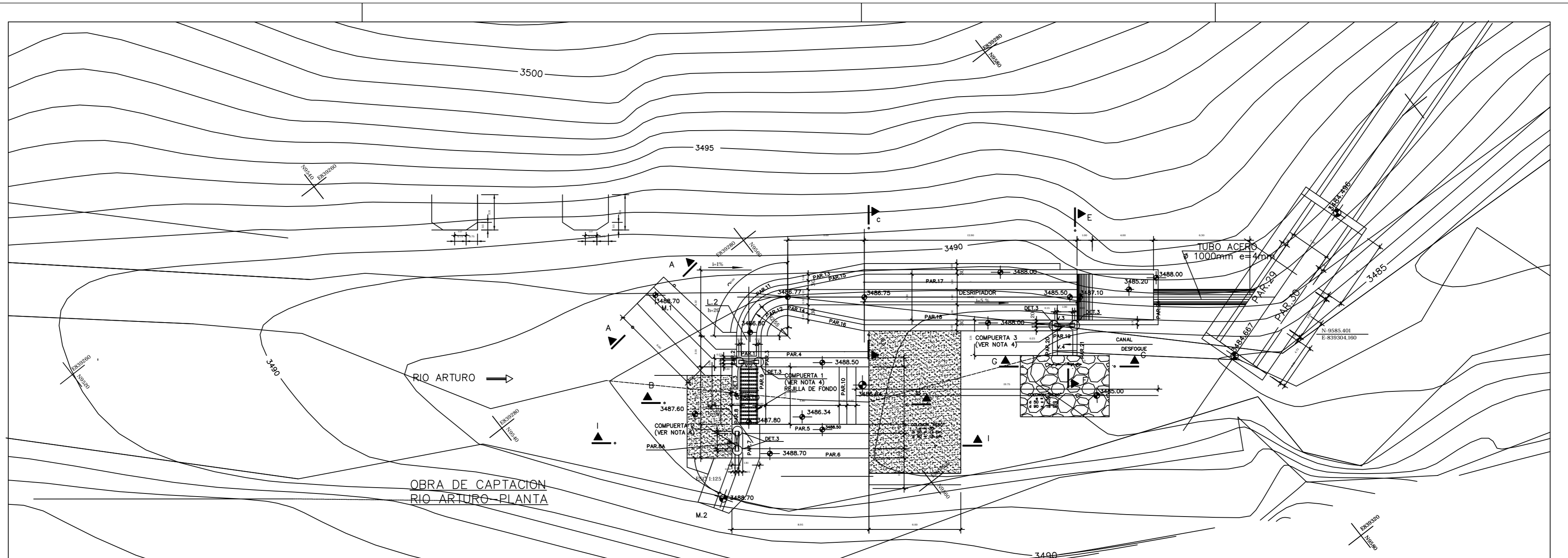
VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN

TABLA N. 6.1	
D en mm	W en cm/s
0.05	0.18
0.10	0.85
0.15	1.56
0.20	2.16
0.25	2.70
0.30	3.24
0.35	3.78
0.40	4.32
0.45	4.86
0.50	5.40
0.55	5.94
0.60	6.48
0.70	7.32
0.80	8.07
1.00	9.44
2.00	15.29
3.00	19.25
4.00	24.90


ELABORADO POR; Herrera Diego

ANEXO 3.3

**PLANOS ORIGINALES DE LA TOMA DEL RÍO ARTURO PROPORCIONADO
POR EL GOBIERNO PROVINCIAL DE PIGHINCHA.**



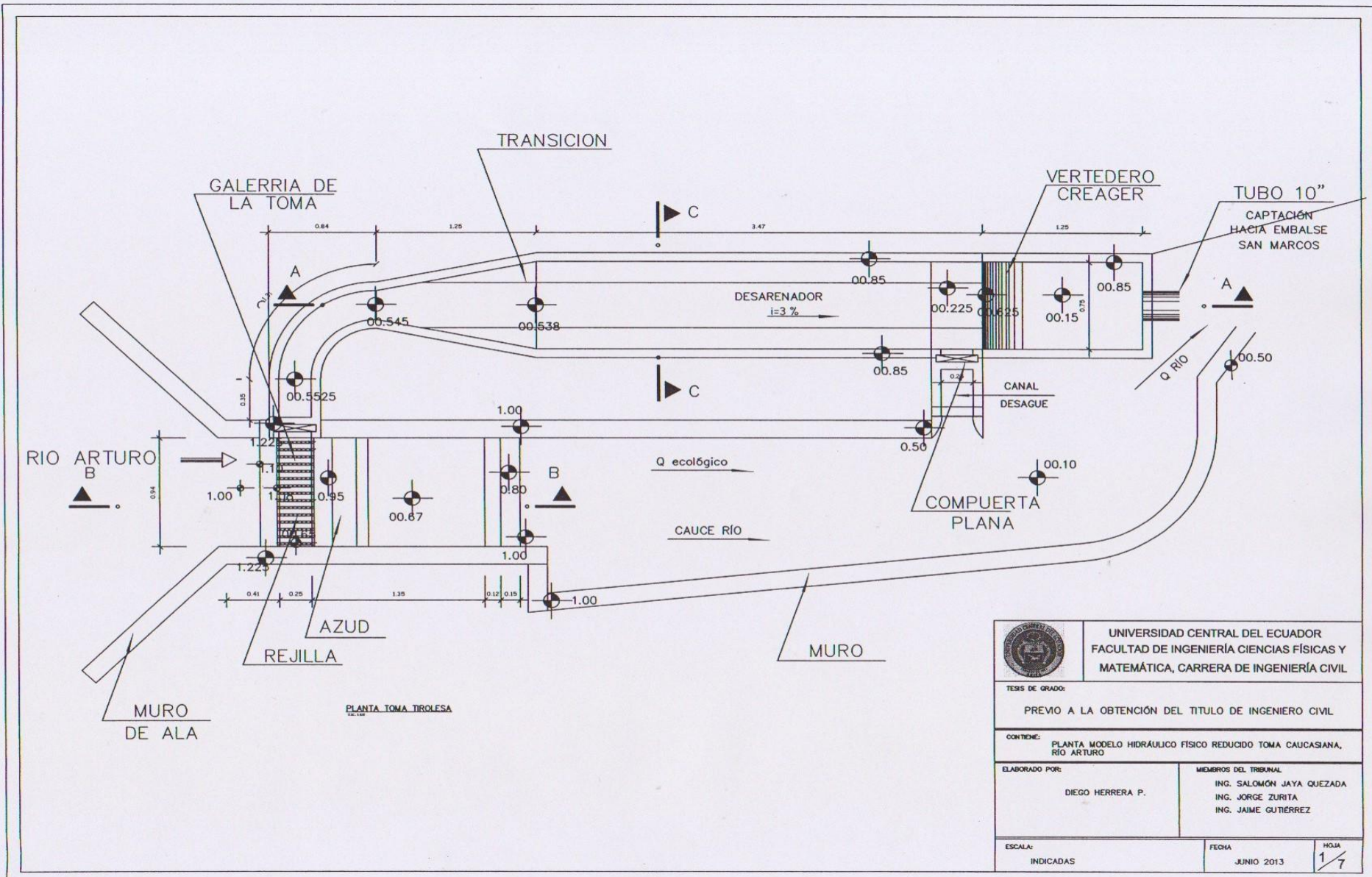
- NOTAS:**
- 1 - DIMENSIONES EN CENTIMETROS, NIVELES EN METROS.
 - 2 - HORMIGON ESTRUCTURAL: $f_c > 25$ MPa.
 - 3 - LAS DIMENSIONES PREVALEGEN SOBRE LA ESCALA.
 - 4 - RELLENO DE HORMIGON SIMPLE $f_c > 15$ MPa.

 <p>CONTIENE: BOCATOMA RIO ARTURO UBICACION - CORTES, DETALLES</p>			
UNIDAD EJECUTORA DEL PROYECTO TABACUNDO			
DISEÑO HIDRAULICO		<i>Franklin Burbano</i>	
ING. FRANKLIN BURBANO V.			
SUBDIRECTOR INFRAESTRUCTURA COMUNITARIA		COORDINADOR DEL PROYECTO TABACUNDO-CAYAMBE	
REVISADO POR		APROBADO POR	
<i>Jose Megrete</i>		<i>Luis Jarrin</i>	
M.C. JOSE MEGRETE		LUIS JARRIN	
DIBUJO	ESCALA:	FECHA	HOJA
EYR	INDICADAS	ABRIL 2010	1

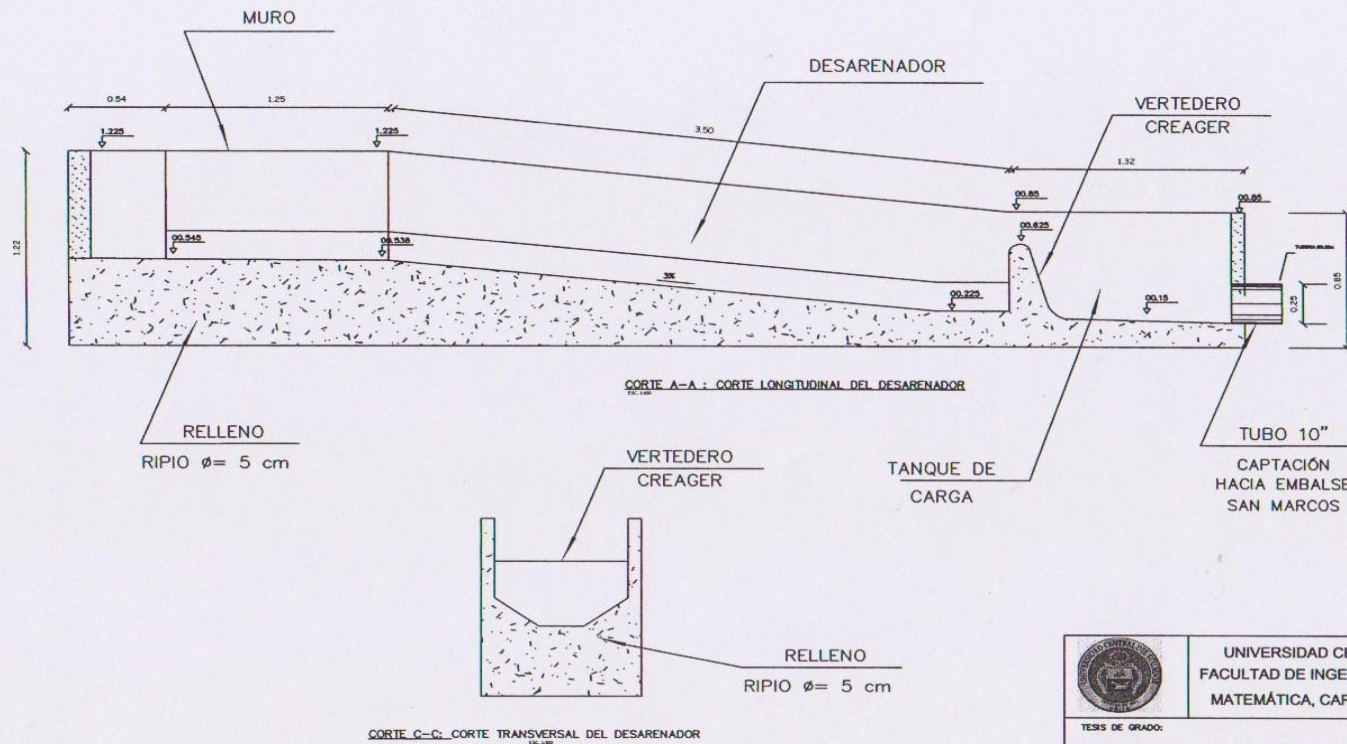
PROYECTO DE RIEGO Y AGUA POTABLE TABACUNDO CAYAMBE

ANEXO 5.1

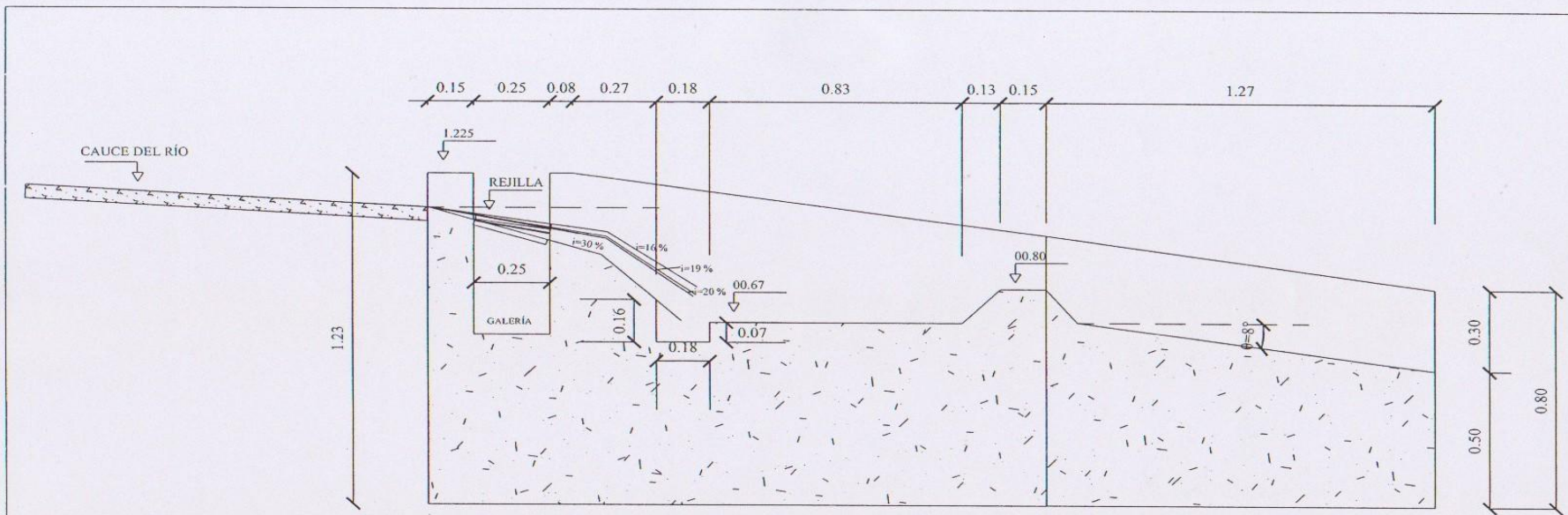
LOS PLANOS Y DETALLES DEL MODELO HIDRÁULICO FÍSICO REDUCIDO



	UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA, CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
	TESIS DE GRADO: PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL	
CONTIENE: PLANTA MODELO HIDRÁULICO FÍSICO REDUCIDO TOMA CAUCASIANA, RÍO ARTURO		
ELABORADO POR: DIEGO HERRERA P.	MIEMBROS DEL TRIBUNAL ING. SALOMÓN JAYA QUEZADA ING. JORGE ZURITA ING. JAIME GUTIERREZ	
ESCALA: INDICADAS	FECHA: JUNIO 2013	HOJA: 1/7




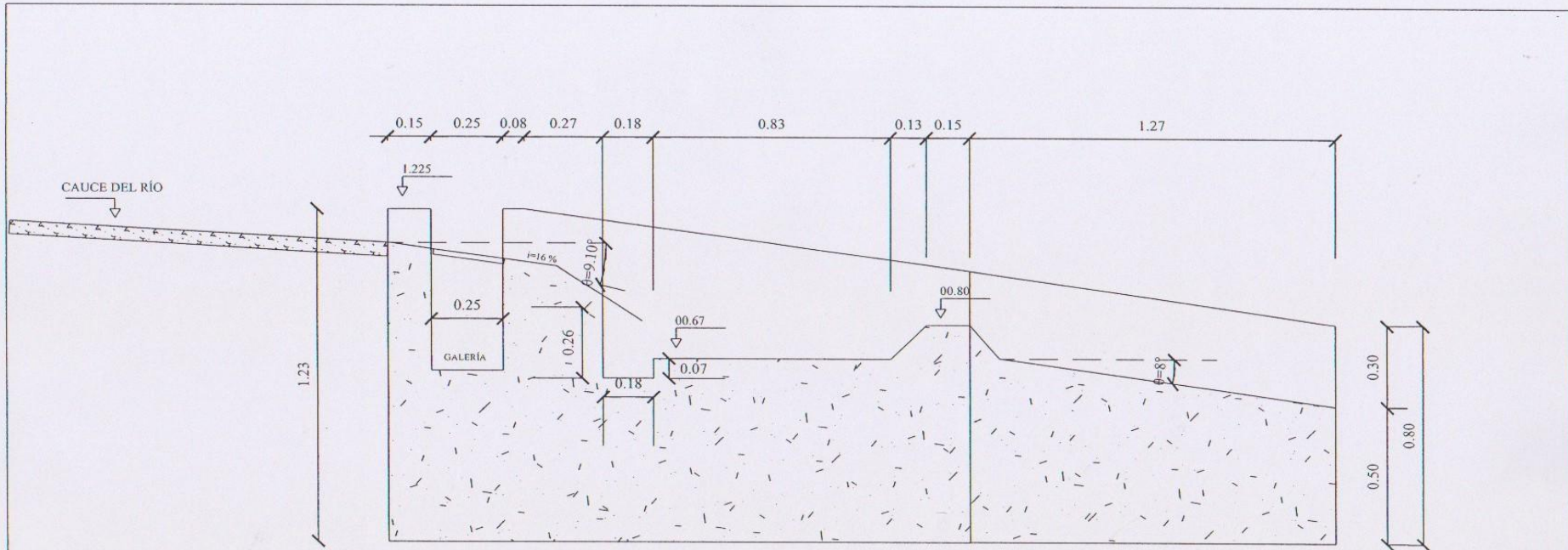
 UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA, CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS DE GRADO: PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL		
CONTIENE: CORTE A-A: CORTE LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL DEL DESARENADOR		
ELABORADO POR: DIEGO HERRERA P.	MIEMBROS DEL TRIBUNAL: ING. SALOMÓN JAYA QUEZADA ING. JORGE ZURITA ING. JAIME GUTÉRREZ	
ESCALA: INDICADAS	FECHA: JUNIO 2013	HOJA: 2/7



ESQUEMA REPRESENTATIVO DE LAS TRES VARIACIONES DE INCLINACIÓN DE LA REJILLA


ESC. 1:100

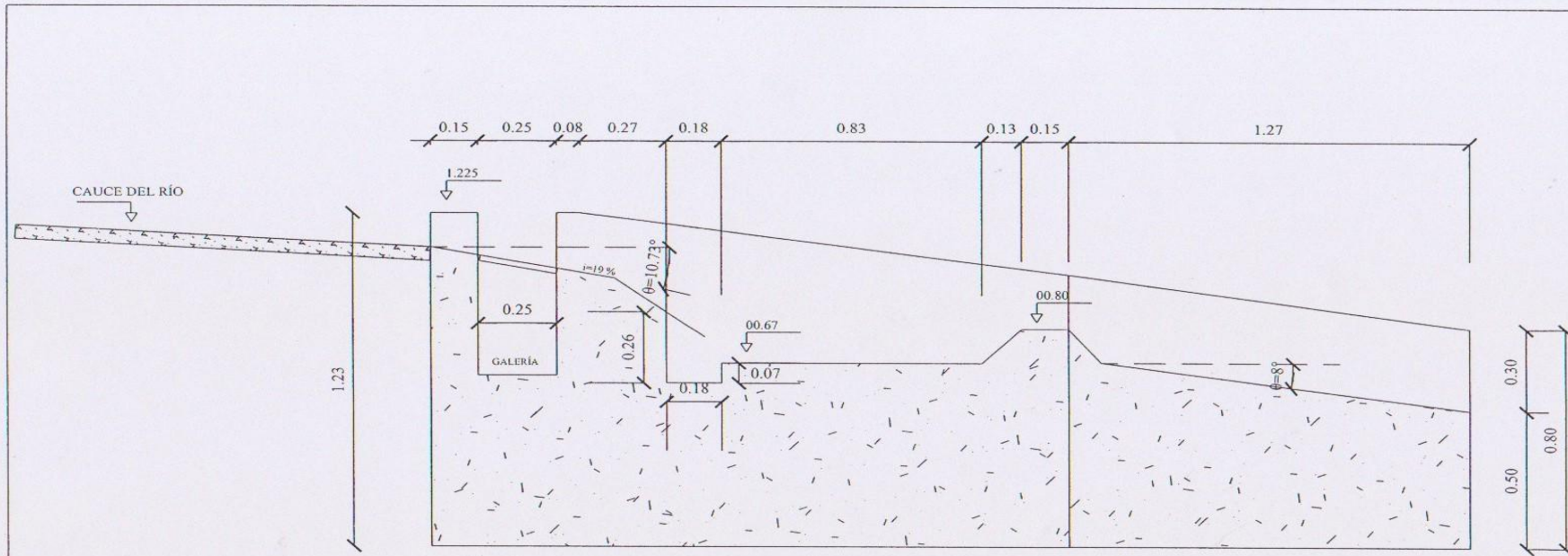
	UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA, CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
	TESIS DE GRADO: PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL	
CONTIENE: CORTE B-B: AZUD, REJILLA CON INCLINACIÓN DEL 19%		
ELABORADO POR: DIEGO HERRERA P.	MIEMBROS DEL TRIBUNAL ING. SALOMÓN JAYA QUEZADA ING. JORGE ZURITA ING. JAIME GUTIÉRREZ	
ESCALA: INDICADAS	FECHA: JUNIO 2013	HOJA: 3/7



CORTE B-B: AZUD, REJILLA CON INCLINACIÓN DEL 16%


ESC. 1:100

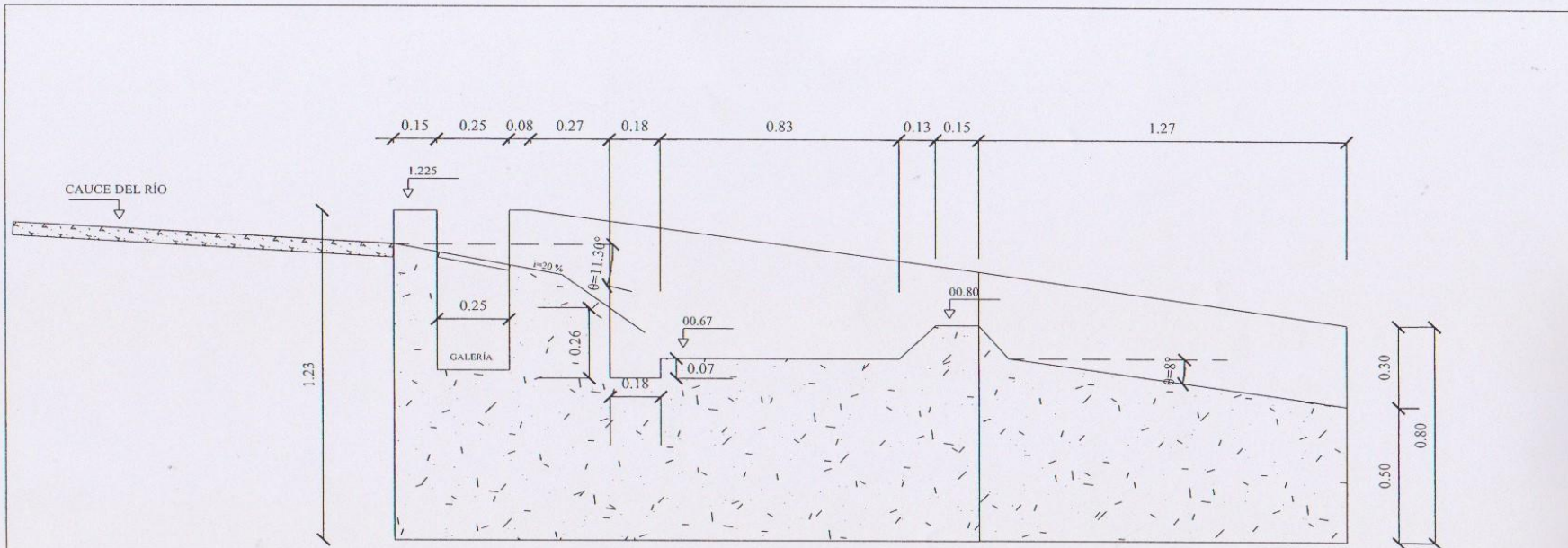
		UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA, CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
TESIS DE GRADO:			
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL			
CONTIENE:			
CORTE B-B: AZUD, REJILLA CON INCLINACIÓN DEL 19%			
ELABORADO POR:		MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
DIEGO HERRERA P.		ING. SALOMÓN JAYA QUEZADA ING. JORGE ZURITA ING. JAIME GUTIÉRREZ	
ESCALA:	FECHA:	HOJA:	
INDICADAS	JUNIO 2013	4 / 7	



CORTE B-B: AZUD, REJILLA CON INCLINACIÓN DEL 19%

ESCALA: 1:100

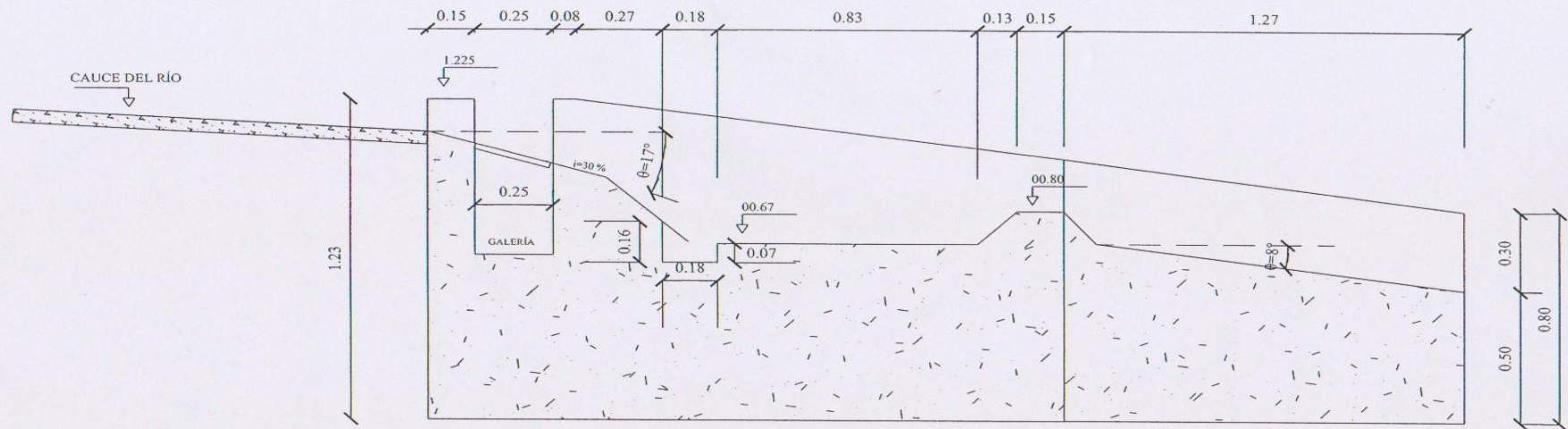
		UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA, CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
TESIS DE GRADO:			
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL			
CONTIENE:			
CORTE B-B: AZUD, REJILLA CON INCLINACIÓN DEL 19%			
ELABORADO POR:		MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
DIEGO HERRERA P.		ING. SALOMÓN JAYA QUEZADA ING. JORGE ZURITA ING. JAIME GUTIÉRREZ	
ESCALA:		FECHA:	HOJA:
INDICADAS		JUNIO 2013	5 / 7



CORTE B-B: AZUD, REJILLA CON INCLINACIÓN DEL 20%.

ESC. 1:100

	UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA, CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
	TESIS DE GRADO: PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL	
CONTIENE: CORTE B-B: AZUD, REJILLA CON INCLINACIÓN DEL 20%		
ELABORADO POR: DIEGO HERRERA P.	MIEMBROS DEL TRIBUNAL ING. SALOMÓN JAYA QUEZADA ING. JORGE ZURITA ING. JAIME GUTIÉRREZ	
ESCALA: INDICADAS	FECHA JUNIO 2013	HOJA 6 / 7



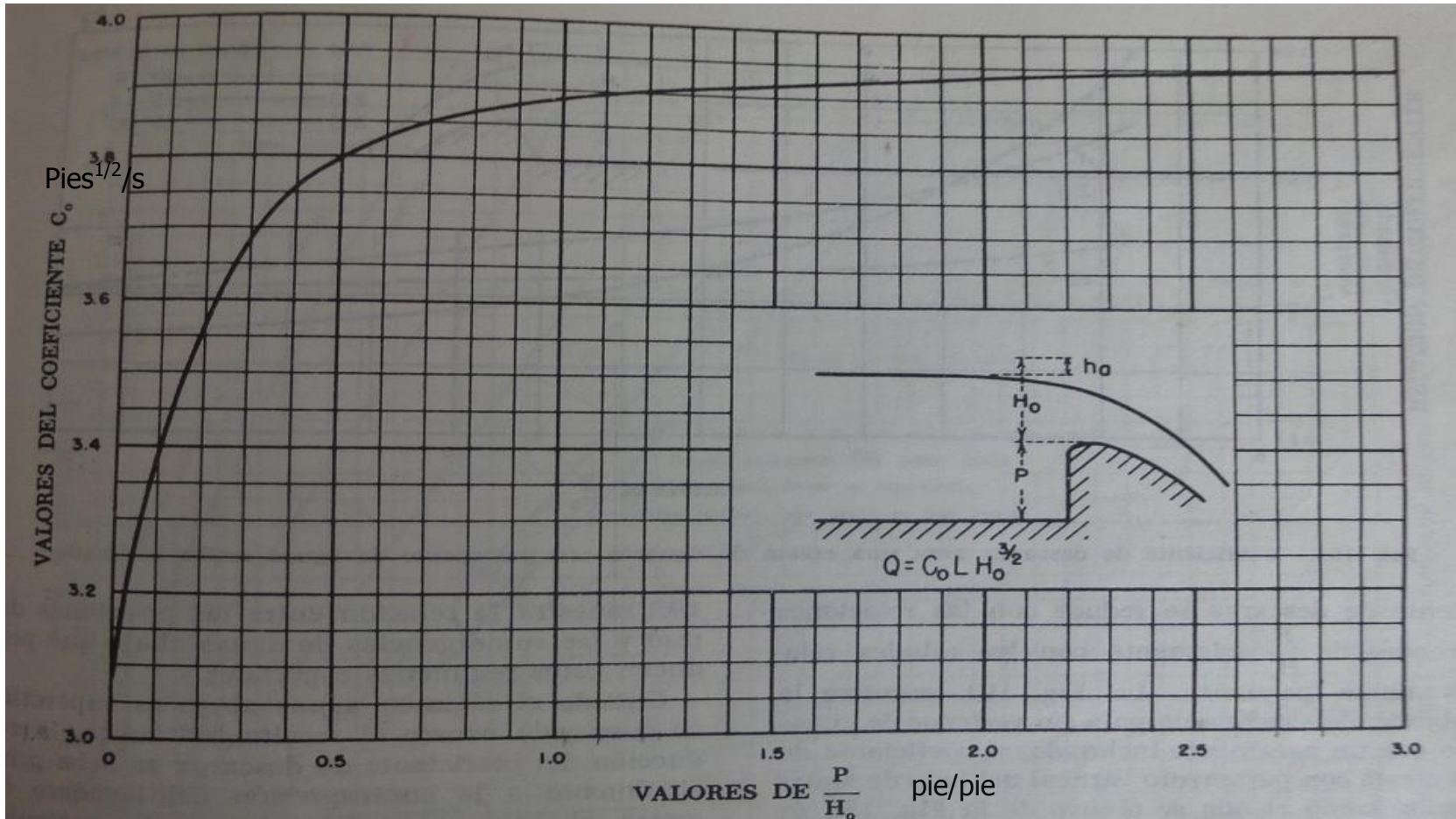
CORTE B-B: AZUD, REJILLA CON INCLINACIÓN DEL 30%

ESC. 1:100

		UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA, CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
TESIS DE GRADO:			
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL			
CONTIENE:			
CORTE B-B: AZUD, REJILLA CON INCLINACIÓN DEL 30%			
ELABORADO POR: DIEGO HERRERA P.		MIEMBROS DEL TRIBUNAL ING. SALOMÓN JAYA QUEZADA ING. JORGE ZURITA ING. JAIME GUTIÉRREZ	
ESCALA: INDICADAS		FECHA JUNIO 2013	HOJA 7/7

ANEXO 6.1

Fig 189. Coeficiente de descarga para las crestas de cimacio en pared vertical



ANEXO 6.2

TABLA 7.1. Fórmulas experimentales para determinar el coeficiente de gasto μ o aplicable a las Ec. (7.5) para vertederos rectangulares con contracciones laterales o sin ellas. En el caso de vertederos sin contracciones laterales haga $b=B$, en las fórmulas ¹⁴.

Autor	Fórmula	Límites de aplicación	Observaciones
Hegly (1921) (Ref. 30.)	$\mu = \left[0.6075 - 0.045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0.0041}{h} \right] \cdot \left[1 + 0.55 \cdot \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$	$0.1 \text{ m} \leq h \leq 0.6 \text{ m}$ $0.5 \text{ m} \leq b \leq 2.00 \text{ m}$ $0.2 \text{ m} \leq w \leq 1.13 \text{ m}$	El primer límite de aplicación es el más importante. Para $h/b > 0.13$ tiene mayor precisión que la fórmula SIAS.
Sociedad de Ingenieros y Arquitectos Suizos (1924) (Ref. 9) (Fórmula SIAS)	$\mu = \left[0.578 + 0.037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3.615 - 3 \left(\frac{b}{B} \right)^2}{1000h + 1.6} \right] \cdot \left[1 + 0.55 \cdot \left(\frac{b}{B} \right)^6 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$	$0.025 \leq h \leq 0.8 \text{ m}$ $b \leq 0.3 B \text{ m}$ $w \leq 0.3 \text{ m}$ $h/w \leq 1$ en el caso de contracciones laterales	Para vertederos sin contracciones laterales los límites son: $0.025 \text{ m} \leq h \leq 0.8 \text{ m}$ $0.3 \text{ m} \leq w$ $h/w \leq 1$ Para $h/b \leq 0.13$, es más precisa que Hegly.
Hamilton - Smith	$\mu = 0.616 \left(1 - \frac{b}{10B} \right)$	$0.075 \text{ m} \leq h \leq 0.6 \text{ m}$ $0.3 \text{ m} \leq b$ $0.3 \text{ m} \leq w$ $h \leq w/2$ $b \leq (B-2h)$ $h/b \leq 0.5$	Si $(b/w) < 10bh$, se deberá reemplazar en la Ec.(7.5) el valor de h por h' donde: $h' = h + 1.4 (Vo^2/2g)$ donde: $Vo = [Q/B(h+w)]$ es la velocidad de llegada
Francis (Ref. 31)	$\mu = 0.623 \left[1 - 0.1n \frac{h}{b} \right] \cdot \left[\left(1 + \frac{Vo^2}{2gh} \right)^{3/2} - \left(\frac{Vo^2}{2gh} \right)^{3/2} \right]$	$0.18 \text{ m} \leq h \leq 0.50 \text{ m}$ $2.40 \text{ m} \leq b \leq 3.00 \text{ m}$ $0.60 \text{ m} \leq w \leq 1.50 \text{ m}$ $b \geq 3h$	$Vo = [Q/B(h+w)]$ velocidad de llegada $n=2$ en vertederos con contracciones laterales $n=0$ en vertederos sin contracciones laterales
Rehbock (1929) (Ref. 9)	$\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{h + 0.0011}{w} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{3/2}$	$0.01 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $b \geq 0.3 \text{ m}$ $w \geq 0.06 \text{ m}$ $h/w \leq 1$	Vale solo para vertederos sin contracciones laterales. Es muy precisa y una de las más utilizadas por su sencillez.

¹⁴ Fuente: Narváez Mayra y Pérez Luis. Estudio en el modelo hidráulico físico del flujo en una toma de fondo tipo caucasiana o tirolesa

ANEXO 6.3

CURVA DE DESCARGA VERTEDERO RECTANGULAR SIN CONTRACCIONES

La ecuación de este vertedero está dada por:

$$Q = C * L * h^{3/2} \quad (\text{ecuación general de vertederos})$$

Donde:

Q = Caudal

C = Coeficiente de descarga

L = ancho vertedero

Donde C está dado por:

$$C = \frac{2}{3} * \sqrt{2g} * \mu$$

Se ha aplicado la fórmula de Rehbock ya que es muy precisa y una de las más utilizadas por su sencillez

$$\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{h + 0.0011}{w} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{3/2}$$

Datos

h= 0.11 m

b= 0.56 m = L

w= 0.40 m

Entonces tenemos que:

$$\mu = 0.6264$$

Por lo que asumimos $\mu=0.62$

C está dado por:

$$C = \frac{2}{3} * \sqrt{2g} * \mu$$

$$C = \frac{2}{3} * \sqrt{2} * 9.8 * 0.62$$

$$C = 1.8299$$

La ecuación del vertedero esta expresada por:

$$Q = C * L * h^{3/2}$$

$$Q = 1.8299 * 0.56 * h^{3/2}$$

$$Q = 1.016 * h^{3/2}$$

Q experimental	Calado (h)	
I/s	M	
0.000	0.000	
0.359	0.005	
1.016	0.010	
1.867	0.015	
2.810	0.0197	Q mínimo
2.874	0.020	
4.016	0.025	
5.279	0.030	
6.653	0.035	
6.880	0.036	Q diseño 85% recomendado
8.128	0.040	
9.699	0.045	
11.359	0.050	
12.190	0.052	Q medio
13.105	0.055	
14.932	0.060	
16.837	0.065	
18.817	0.070	
20.868	0.075	
22.989	0.080	
25.178	0.085	
27.432	0.090	
29.749	0.095	
32.129	0.100	
34.568	0.105	
37.067	0.110	
42.234	0.120	
44.901	0.125	
46.880	0.129	Q diseño
47.622	0.130	
50.396	0.135	
53.221	0.140	
54.060	0.141	Q máximo
56.098	0.145	
59.024	0.150	
62.000	0.155	
65.024	0.160	
68.096	0.165	
71.214	0.170	
74.379	0.175	
77.589	0.180	
80.845	0.185	
84.144	0.190	
87.487	0.195	
90.874	0.200	

CURVA DE DESCARGA VERTEDERO RECTANGULAR SIN CONTRACCIONES LATERALES

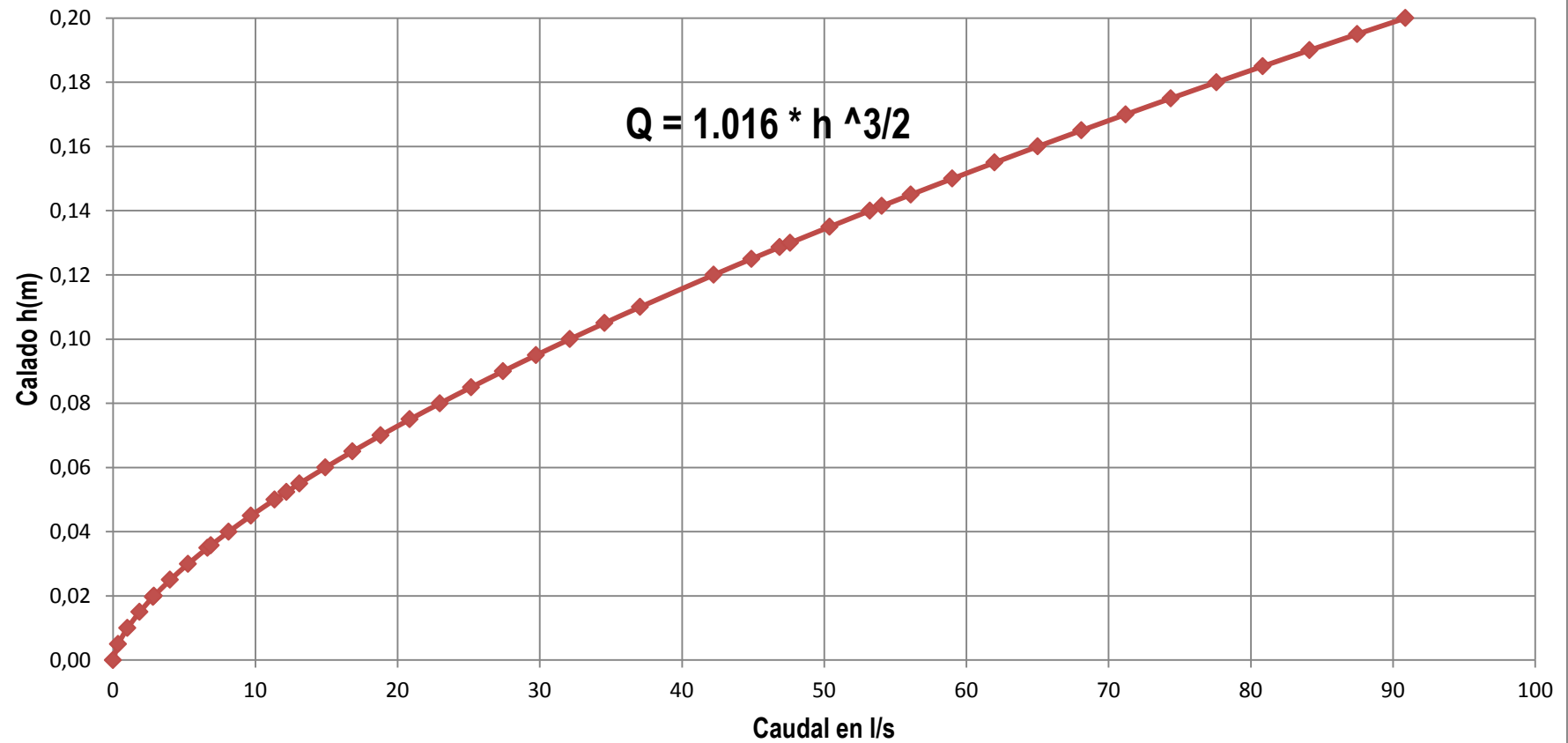


Gráfico A6.5 Curva de descarga vertedero rectangular sin contracciones (Elaborado por Herrera Diego)

ANEXO 6.4

TABLA 7.2. Fórmulas experimentales para determinar los coeficientes de gasto μ o C aplicables a las Ecs. (7.11^a) o (7.11b) para vertederos triangulares con diferentes ángulos θ en el vértice. B representa el ancho del canal de llegada y w el desnivel entre el vértice del vertedor y el fondo de dicho canal. En cualquier caso, las fórmulas se expresan en el sistema MKS.

Autor	Fórmula	Límites de aplicación	Observaciones
Universidad Católica de Chile (Ref. 24)	$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} \mu * K$	Vale para $15^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ La profundidad w no tiene influencia en el coeficiente de gasto.	μ , coeficiente experimental que depende de h y θ según la Fig. 7.9. K es otro coeficiente que depende de B/h según la Fig. 7.10 y vale 1 se B/h ≥ 5 para $\theta=90^\circ$ y si B/h ≥ 2.75 para $\theta=45^\circ$
Gourley y Crimp (Ref. 31).	$C = \frac{1.32 \tan(\frac{\theta}{2})}{h^{0.02}}$	Vale para ángulos θ de 45° , 60° y 90° y para profundidades w grandes.	Esta fórmula, substituida en la ecuación (7.11b), conduce a la ecuación: $Q=1.32 \tan(\theta/2)h^{2.48}$
Hegly (1921) (Ref. 31.)	$\mu = \left[0.5812 + \frac{0.00375}{h} \right] * \left\{ 1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)} \right]^2 \right\}$	Vale para $\theta = 90^\circ$ $0.1m \leq h \leq 0.5 m$ y profundidades w pequeñas	Es de las fórmulas más precisas para vertederos con ángulo en el vértice $\theta=90^\circ$
Barr (1909) (Ref. 22).		Vale para $\theta = 90^\circ$ con cargas $0.05m \leq h \leq 0.25 m$ $w \geq 3h$ $B \geq 8h$	El valor medio $\mu=0.593$ que resulta de esta fórmula corresponde bastante al resultado de Thompson (1861) y que substituído en la Ec. (7.11a), conduce a la ecuación: $Q=1.42h^{3/2}$
Koch (1923) Yarnal (1926)	$\mu = 0.58$	Vale para $\theta = 90^\circ$ con cargas muy grandes $w \geq 3h$ $B \geq 8h$	No se limita con precisión el rango de validez.
Heydrickx (Ref. 30).	$\mu = [0.5775 + 0.214h^{1.25}] * \left\{ 1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)} \right]^2 \right\}$	Vale para $\theta = 60^\circ$ con cargas normales	Es bastante precisa.