



RESUMEN

La presente tesis es un estudio experimental de las variables que rigen el fenómeno de la disipación de energía debido a la descarga de flujo a través de una estructura de compuerta perteneciente al Proyecto Hidroeléctrico denominado "Hidro San Bartolo" y que tiene como objetivo principal la evaluación de los diseños originales presentados por la compañía diseñadora encargada del proyecto HIDROSANBARTOLO S.A y la optimización de las alternativas de diseño propuestos. El estudio hidráulico fue delegado al Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS).

Para la realización del estudio se planteó la construcción de un modelo físico a escala de la obra de toma del proyecto y de modelos a escala únicamente de los disipadores de energía propuestos.

Las experimentaciones se realizaron en dos partes:

La primera parte se la realizó en los disipadores del modelo de obra de toma donde se evaluó e identificó el problema de desempeño en el diseño inicial, posteriormente se realizaron los diseños y construcción de los modelo alternativos al modelo original.

La segunda parte del estudio se concentró en la realización de ensayos en los modelos de las alternativas propuestas al diseño original, presentando los resultados en graficas comparativas en base a las características de la disipación de energía y finalmente se amasaron los resultados obteniendo, conclusiones y criterios de diseño para el disipadores de energía que se adaptó de mejor manera a la obra de captación.

Palabras Claves: Disipadores de energía, Curva de Descarga, Compuertas, Resalto hidráulico, HIDROSANBARTOLO



CONTENIDO

Lista de Tablas	12
LISTA DE FIGURAS	13
CAPITULO 1	16
1. INTRODUCCION.....	16
1.1. Antecedentes y justificación	16
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo General.....	17
1.2.2. Objetivos Específicos	17
1.2.3. Alcance.....	17
CAPITULO 2	19
2. MARCO TEORICO	19
2.1. Modelaje Hidráulico.....	19
2.2. Clases de modelos.....	19
2.2.1. Modelos Matemáticos.....	19
2.2.2. Modelos Físicos Reducidos.....	20
2.3. Similitud.....	21
2.3.1. Similitud Geométrica.....	21
2.3.2. Similitud Cinética	22
2.3.3. Similitud Dinámica	23
2.3.4. Leyes de Similitud Dinámica.....	24
2.3.4.1. Condición de Froude	24
2.3.5. Consideraciones para seleccionar la Escala	25
2.3.6. Efectos de Escala	25
2.4. Compuertas Radiales o Taintor.....	26
2.5. DISIPACION DE ENERGIA	29
2.5.1. Introducción	29



UNIVERSIDAD DE CUENCA

2.5.2.	Análisis del Resalto Hidráulico.....	30
2.5.3.	Tipos de Resalto hidráulico	30
2.5.4.	Longitud del resalto hidráulico	31
2.5.5.	Características básicas del resalto	32
2.5.5.1.	Perdidas de Energía	32
2.5.5.2.	Eficiencia.....	32
2.5.5.3.	Altura del resalto	33
2.5.6.	Perfil del Resalto Hidráulico.....	33
2.6.	Cuenca Disipador.....	34
2.6.1.	Tipos de Cuencos disipadores.....	34
	Estructuras Normalizadas	34
	Estructuras del Bureau of Reclamation (USBR)	37
CAPITULO 3	42
3.	MATERIALES Y METODOS.....	42
3.1.	Metodología General de Estudio.....	42
3.2.	Descripción General del Proyecto Hidroeléctrico San Bartolo	43
3.2.1.	Ubicación del proyecto de obra de captación.	44
3.3.	Consideraciones generales para el Modelo del Rio Negro	45
3.3.1.	Consideraciones Hidrológicas para el diseño.	45
	□ Consideraciones adicionales para el modelo	46
	□ Conceptualización para el Modelo	47
3.4.	Equipamiento y laboratorio.....	47
3.4.1.	Laboratorio de modelación Hidráulica del PROMAS	47
3.4.2.	Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Cuenca.....	49
3.5.	Descripción General del modelo físico Global.....	50
3.5.1.	Escalamiento de variables geométricas e hidráulicas	51
3.5.2.	Construcción del Modelo Físico.....	52
3.6.	Descripción de los parámetros y variables de estudio para la experimentación en la compuerta.	53
3.6.1.	Calibración de la compuerta.	54



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Coeficiente de Descarga	55
Curva de Descarga.....	61
3.6.2. Validación de la curva de Descarga.	62
3.7. Descripción de la estructura de disipación de energía propuesta en el diseño original.....	65
3.7.1. Identificación de los problemas relacionados con la disipación de energía.....	66
3.7.2. Descripción de las variables de estudio que intervienen en el experimentación de disipadores, medición y toma de datos.....	71
CAPITULO 4	74
4. ESTUDIO EN MODELO FISICO PARA OPTIMIZACION DEL DISEÑO	74
4.1. Alternativas propuestas para el diseño de disipadores	74
4.1.1. Alternativa 1: cuenco disipador tipo I de la USBR con pendiente de 1,5%	74
4.1.2. Alternativa 2: Cuenco disipador tipo cuña.	76
4.1.3. Alternativa 3: cuenco disipador tipo IV de la USBR	78
□ Variante a la alternativa 3: del cuenco disipador tipo IV de la USBR	81
CAPITULO 5	84
5. RESULTADOS	84
5.1. Resultados de la alternativa 1 de cuenco disipador.	84
5.2. Resultados de la alternativa 2 de cuenco disipador	86
5.3. Resultados de la alternativa 3 del cuenco disipador	92
5.3.1. Variante a la alternativa 3: -3m de profundidad del cuenco en el prototipo.....	95
5.4. Comparación de resultados de las alternativas propuestas	98
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	100
6.1. Observaciones	102
7. CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
BIBLIOGRAFIA	107
ANEXOS	109
A.1 Cálculos:.....	109



UNIVERSIDAD DE CUENCA

A.1.1	Datos para la Construcción de la Curva de descarga.....	109
A.1.2	Validación de la curva de descarga.....	111
A.1.2.1	Datos de ensayos de aforamiento del modelo:	111
A.2.2	Cálculos para el diseño de perfil Creager.....	117
A.2.2.1	Alternativa 2.....	117
A.2.2.2	Alternativa 3.....	118
A.2.2.3	Variante a la alternativa 3.	119
A.3	Fotografías de los ensayos.....	120
A.3.1	Alternativa 1	120
	<input type="checkbox"/> Máxima carga H=12,8m Prototipo 25,6cm modelo, Q=370m ³ /s Prototipo; Condiciones aguas arriba Y2'= 5,5m prototipo , 11cm Modelo.....	120
	<input type="checkbox"/> Máxima carga H=12,8m Prototipo 25,6cm modelo, Q=370m ³ /s Prototipo; Descarga libre.....	120
A.3.1	Alternativa 2.....	121
	<input type="checkbox"/> Máxima carga H=12,8m Prototipo 25,6cm modelo, Q=370m ³ /s Prototipo; Descarga libre.....	121
	<input type="checkbox"/> Máxima carga H=12,8m Prototipo 25,6cm modelo, Q=370m ³ /s Prototipo; Condiciones aguas arriba Y2'= 8,5m prototipo , 17cm Modelo.....	122
A.3.2	Alternativa 3.....	122
	<input type="checkbox"/> Máxima carga H=12,8m Prototipo 25,6cm modelo, Q=370m ³ /s Prototipo; Descarga libre.....	122
A.3.2	Variante a la Alternativa 3.....	123
	<input type="checkbox"/> Máxima carga H=12,8m Prototipo 25,6cm modelo, Q=370m ³ /s Prototipo; Descarga libre.....	123
A4.	Planos de la estructura de captación para el proyecto Hidroeléctrico San Bartolo.....	124



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA Fundada en 1867

Yo, Juan Fernando Abril González, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Juan Fernando Abril González
010443824-7

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA Fundada en 1867

Yo, Juan Fernando Abril González, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Juan Fernando Abril González".

Juan Fernando Abril González
010443824-7

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil
Av. 12 de Abril s/n, Cuenca

**ESTUDIO EN MODELO FISICO PARA EL DISEÑO DE LA OBRA DE
DISIPACION DE ENERGIA EN UNA ESTRUCTURA DE COMPUERTAS**

Director:
Ing. Verónica Carrillo.

Tesis previa a la obtención
del Título de Ingeniero Civil

Tutor:
Ing. Esteban Pacheco., MSc.

Autor:
Juan Fernando Abril González

Cuenca - Ecuador
Octubre 2012



LISTA DE SÍMBOLOS

A=área

a=abertura de la compuerta

a = aceleración

b=ancho de compuerta

bc= ancho de aforo del canal

C_d =Coeficiente de descarga del azud

e = *subíndice escala*

E=energía específica

F = Numero de Froude

F_1 = Numero de Froude contraído

F_v = fuerza de viscosidad

F_g = fuerza de gravedad

F_p =fuerza de presión

F_σ = fuerza de tensión superficial

g = aceleración de la gravedad

H = carga hidráulica o calado aguas arriba

H_o =Altura de agua sobre el perfil Creager.

h =altura del muñón

h_c = calado de aforo

K, n=Parámetros adimensionales para el cálculo del perfil Creager

L = longitud característica

L_r = Longitud del resalto

L_B =Longitud del cuenco dissipador SAF

m =*subíndice Modelo*

p =*subíndice prototipo*



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Q = caudal

r = radio

v = velocidad media

V_f = velocidad final media o de salida del cuenco.

W = ancho del dado disipador

$Y_1 = D_1$ = altura contraída del resalto

$Y_2 = D_2$ = altura secuente del resalto

Y_3 = Calado al final del cuenco o a la salida del cuenco.

Y_2' = calado del Rio aguas abajo del disipador

z = Profundidad del Cuenco.

ΔE = Diferencia de energías específicas

θ = Angulo de abertura



Lista de Tablas

Tabla 3-1. Caudales Medios Mensuales en los Sitios de Toma del Aprovechamiento Copal - San Bartolo en m³/s (Tomado de Estudio En Modelo Hidráulico Para La Optimización Del Diseño De La Obra De Captación En El Río Negro Del Proyecto Hidroeléctrico Hidrosanbartolo. (Pacheco & Carrillo, 2012) .. 46

Tabla 3-2. Especificaciones bomba eléctrica del sistema (Pacheco & Carrillo, 2012) 48

Tabla 3-3.valores de coeficiente de descarga Cd. (Schrodes y Press, 1966) 55

Tabla 3-4. Ángulos de abertura entre la compuerta y la horizontal 57

Tabla 3-5. interpolación del coeficiente de descarga para los ángulos de estudio de la tabla 3-4..... 57

Tabla 3-6. Resultados del aforamiento. Prototipo 64

Tabla 4-1. Resultados del diseño-alternativa 3 (5m de profundidad en el prototipo). 79

Tabla 4-2.Resultados del diseño-alternativa 3 (10cm de profundidad en el modelo) 79

Tabla 4-3. Longitudes de resalto alternativos..... 79

Tabla 4-4. Diseño de Bloques disipadores en la entrada del cuenco tipo IV USBR 80

Tabla 4-5. Variante al disipador de la alternativa 3 tipo IV de la USBR - Prototipo 81

Tabla 4-6. Variante al disipador de la alternativa 3 tipo IV de la USBR - Modelo.. 82

Tabla 5-7. Resultado de los ensayos de la alternativa 1. Modelo 84

Tabla 5-8. Resultado de los ensayos de la alternativa 1. Prototipo..... 84

Tabla 5-9. Resultados ensayos con calado aguas arriba. alternativa 1 Modelo.... 85

Tabla 5-10. Resultados de los ensayos con calado aguas arriba. alternativa 1. Prototipo 86

Tabla 5-3. Resultados alternativa 2. Modelo 89

Tabla 5-4. Resultados alternativa 2. Prototipo..... 90

Tabla 5-5. límites de resalto hidráulico. Alternativa 2. Modelo 91

Tabla 5-6. límites del resalto hidráulico. alternativa 2. Prototipo 91

Tabla 5-1. . Resultados de los ensayos alternativa 3-profundidad del cuenco 10cm-Modelo 92

Tabla 5-2. Resultados de los ensayos alternativa 3- profundidad del cuenco 5m prototipo 93



LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Similitud Cinética.....	23
Figura 2-2. DESIGN OF SPILLWAY TAINTOR GATES (U.S. Army Corps of Engineers, 2000)	26
Figura 2-3. Flujo a través de compuertas (libre y sumergido)	27
Figura 2-4. Coeficientes de descarga para compuertas radiales según A.Toch ...	28
Figura 2-5. Coeficiente de descarga de compuertas radiales para flujos libres según Gentilini.....	29
Figura 2-6. Cambios de Régimen. a) De subcrítico a supercrítico. b) de supercrítico a subcrítico (resalto hidráulico)	30
Figura 2-7. tipos de resalto (chow, 2004)	31
Figura 2-8. Longitud de Resalto en términos de profundidad secuente y_2 en canales horizontales según la USBR (chow,2004).....	32
Figura 2-9. curvas características del resalto hidráulico (chow, 2004)	33
Figura 2-10. perfiles superficiales adimensionales de resaltos hidráulicos (ven te Chow, 2004)	34
Figura 2-11. Dimensiones del cuenco SAF (Chow, 2004).....	37
Figura 2-12. dimensiones del cuenco USBR II (hidráulica de canales abiertos, chow).....	38
Figura 2-13. Dimensiones del cuenco USBR III	40
Figura 2-14. Gráfico para determinación de las dimensiones de los bloques de impacto y umbral final	41
Figura 2-15. dimensiones del cuenco IV USBR	42
Figura 3-1.Esquema de la obra de captación y conducción para el proyecto hidroeléctrico “San Bartolo”	44
Figura 3-2 Ubicación del proyecto "Hidro San Bartolo"	45
Figura 3-3. a) línea de succión y descarga. b) tanques de reserva. c) equipo de bombeo	49
Figura 3-4. a) Canal Armiefld Tilting Flume S6. b) Bomba del canal.....	50
Figura 3-5.Configuración del Cauce y Lecho Mayor del Río Negro. a) colocación de sacos de arena. b) colocación de chova	52
Figura 3-6. Obra de Toma	53
Figura 3-7. Variables que intervienen en la compuerta de lavado y mantenimiento	54
Figura 3-8. . Curva aproximada de Gentilini según los valores de Schrodes y Press - Ajuste del coeficiente de descarga.....	55



Figura 3-9. Ajuste de la Curva de descarga para los ángulos de la tabla 3-3. Las curvas en línea continua corresponden al ajuste teórico de los datos de Schrodes y Press 60

Figura 3-10. Curva de Descarga para diferentes aberturas de la compuerta. Prototipo 62

Figura 3-11. implementación del modelo de compuerta en el canal de Hidráulica. Q=caudal, H=calado aguas arriba, a=abertura, r=radio, h= altura del Muñón..... 64

Figura 3-12.Grafica de validación de la curva de descarga. Prototipo 65

Figura 3-13. Dimensiones y cotas del diseño original para la dissipador de energía en el modelo (HIDROTECH) 66

Figura 3-14. influencia del flujo sobre el enrocado. $a=1\text{m}$, $Q=75\text{m}^3/\text{s}$, $v=11,16\text{m/s}$ 67

Figura 3-15. Enrocado después del ensayo. $a=3\text{m}$, $180\text{m}^3/\text{s}$ y $v=11,88\text{m/s}$ de salida en el prototipo 68

Figura 3-16. socavación del enrocado durante el ensayo y del lecho del Rio. $a=4\text{m}$, $v=12,36\text{m/s}$ en el prototipo 68

Figura 3-17. socavación después del ensayo. $a=7\text{m}$, $Q=370\text{m}^3/\text{s}$, $v=14,5\text{m/s}$ en el prototipo. Abierto las tres compuertas de mantenimiento..... 69

Figura 3-18. Contracción del flujo a la salida del canal de disipación. 70

Figura 3-19. a) resalto hidráulico cuando calado aguas abajo del Rio y_2' es igual al calado secuente y_2 ; 70

Figura 3-20. azolvamiento en la compuerta de lavado..... 71

Figura 3-21. conservación de la energía 72

Figura 4-1. Alternativa 1: Cuenco tipo 1 de la USBR Prototipo 75

Figura 4-2. modelo de la Alternativa 1: USBR tipo I 75

Figura 4-3. Perfil Creager de la superficie de entrada al cuenco para alternativa 2- prototipo 77

Figura 4-4. Alternativa 2. tipo cuña - Prototipo 77

Figura 4-5. Alternativa 2 tipo cuña - Modelo..... 78

Figura 4-6. Diseño perfil Creager de entrada - alternativa 3 USBR IV 78

Figura 4-7. Alternativa 3: cuenco dissipador USBR tipo IV-prototipo 80

Figura 4-8.Alternativa 3: cuenco dissipador USBR tipo IV-Modelo 81

Figura 4-9. Variante a la alternativa 3. Prototipo 82

Figura 4-10. Variante a la alternativa 3. Modelo..... 82

Figura 4-11. Perfil Creager, cuenco dissipador tipo IV USBR- prototipo..... 83

Figura 5-1. Resultado de los ensayos- alternativa 2 de cuenco dissipador. Modelo87

Figura 5-2. Resultados de los ensayos- alternativa 2. Prototipo 88

Figura 5-3. Límite del resalto hidráulico. Modelo 94

Figura 5-4.límite del resalto hidráulico - prototipo..... 94



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Figura 5-5. Resultados de los ensayos - variante de la alternativa 3. Modelo.	95
Figura 5-6. Resultados de los ensayos- variante de la alternativa 3. Prototipo	96
Figura 5-7. límites del resalto. variante de la alternativa 3	97
Figura 5-8. límites del resalto. Variante de la alternativa 3.....	97
Figura 5-9.. Curva de eficiencia del resalto vs. caudal - Prototipo.....	98
Figura 5-10.Curva de caudal vs. Velocidad de salida del canal - Prototipo.....	99
Figura 5-11.Curva de caudal vs. calado de salida del dissipador. Prototipo	99
Figura 5-12. Curva de caudal vs. longitud del resalto. Prototipo	100
Figura 6-1. amplitud de la onda producida del resalto oscilante. a) variante Alternativa 3 Máxima descarga; b)alternativa 3. Máxima descarga	102
Figura 6-2. arrastre de material - descarga máxima alternativa 1	103
Figura 6-3. arrastre de material - descarga máxima alternativa 2. Prototipo.....	103
Figura 6-4. arrastre de material. variante de alternativa 3. Modelo	104
Figura 6-5. a) estructura original del cuenco sin pilas al final. b)estructura original del cuenco con implementacion de pilas al final.....	105



CAPITULO 1

1. INTRODUCCION

1.1. Antecedentes y justificación

Los proyectos hidroeléctricos representan hoy en día el método más importante para la obtención de energía eléctrica en nuestro país debido a que sus costes de explotación son bajos y su mejora tecnológica hace que se aproveche de manera eficiente los recursos hidráulicos disponibles, además se considera una de las fuentes de energía más limpias ya que al ser renovable no produce gases ni emisiones tóxicas como en el caso de las termoeléctricas, aunque se requiere grandes inversiones de capital para la ejecución de estos proyectos. Por estas y otras ventajas se han puesto en marcha el diseño y la construcción de varios proyectos hidroeléctricos a nivel nacional, con la finalidad principal de satisfacer en su totalidad la demanda energética en el país, entre los cuales se encuentra el proyecto hidroeléctrico San Bartolo.

Con todo lo expuesto anteriormente, el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC): ente regulador y controlador, a través del cual el Estado Ecuatoriano puede delegar las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica a empresas concesionarias; ha delegado a la empresa privada HIDROSANBARTOLO S.A el diseño del proyecto Hidroeléctrico denominado San Bartolo de 92 MW de capacidad, que utilizará las aguas del río Negro ubicado en la parroquia Copal, Cantón Santiago, Provincia de Morona Santiago.

Los estudios del comportamiento hidráulico de la obra de captación estuvieron a cargo del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, delegado y financiado por la misma empresa diseñadora HIDROSANBARTOLO.S.A; para lo cual se ha dispuesto de la construcción de un modelo físico a escala de la estructura de captación, teniendo como uno de sus principales componentes la disipación de energía proveniente de la descarga de flujo a través de las compuertas que contempla el diseño del proyecto.

La energía cinética esperada debido a la descarga del flujo a través de compuertas es uno de los problemas más importantes que se presentan en este tipo de obras de captación. Esta energía se manifiesta en forma de altas velocidades que al tratar de disminuirlas produce grandes presiones que tienen como consecuencia la socavación y erosión en los lechos de ríos aguas abajo. El



desarrollo de este estudio nos ha permitido evaluar el diseño original en la disipación de energía e identificar las posibles alternativas que se puedan utilizar para el diseño.

La identificación de alternativas de diseño para la disipación de energía en obras hidráulicas, además de estar sujeta a los procesos que rigen los fenómenos de flujo que se proyecten, dependen en gran medida de las condiciones específicas y otros aspectos que demanda cada obra en particular, aspectos como arquitectura de la obra, capacidad en compuertas, carga sobre las mismas, condiciones morfológicas del cauce, etc. Un diseño hidráulico basado exclusivamente en relaciones matemáticas de flujo unidimensional o bidimensional, no contempla los factores antes mencionados, lo cual hace necesario complementar los estudios con modelos físicos que incorporan de una u otra manera aspectos que no pueden ser identificados o que escapan del alcance al cual se sujeta la teoría simplificada.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Contribuir a la optimización del diseño de la obra de captación para el proyecto hidroeléctrico "Hidro San Bartolo" mediante el estudio de disipación de energía en modelo físico de escala reducida.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar los diferentes parámetros y variables que influyen en el comportamiento hidráulico del flujo a través de una Compuerta Radial los mismos que están relacionados con la disipación de energía en la estructura del diseño establecido.
- Identificar alternativas para la disipación de energía en la estructura de compuertas
- Realizar un estudio en modelo físico de la alternativa.
- Establecer criterios para el diseño final de la estructura de disipación de energía para el flujo a través de la compuerta Radial.

1.2.3. Alcance

El trabajo realizado se enmarca en una investigación experimental relevante a los procesos de flujo a través de estructuras de control, para mediante la identificación de fenómenos de flujo, variables relevantes, rangos de influencia en efectos de



UNIVERSIDAD DE CUENCA

flujo, desempeño de dimensionamiento de obras, etc., permitir obtener criterios definitivos para control de la disipación de energía y optimización de los diseños definitivos. No ha sido alcance de esta tesis el estudio estructural del dissipador ni aspectos referentes a lavado y manejo de sedimentos en la obra.



CAPITULO 2

2. MARCO TEORICO

2.1. Modelaje Hidráulico

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

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

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

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

2.2. Clases de modelos

2.2.1. Modelos Matemáticos

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

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

- Exactitud de los datos iniciales



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

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

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

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

2.2.2. Modelos Físicos Reducidos

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

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

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

La aplicación de cualquiera de los dos tipos de modelos, físicos o matemáticos, evidentemente tienen sus limitaciones, mismas que van a depender de la



complejidad del problema en la intervención de las variables y sus fronteras a tratar, siendo en algunos casos los modelos matemáticos los más apropiados.

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

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

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

- ✓ Modelos de fondo fijo, si el estudio involucra la reproducción de flujo supecrítico, transiciones, patrones de ondas, perfiles de la superficie del agua, o estructuras en general.
- ✓ Modelos de fondo o lecho móvil, el modelo debe simular movimiento del agua y de los sedimentos (French, R., 1988).

2.3. Similitud

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

La similitud geométrica implica una relación constante entre longitudes. Cuando la comparación entre el prototipo y modelo es con respecto a un movimiento, se establece entonces la similitud cinemática.

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

2.3.1. Similitud Geométrica

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



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

$$L_p = L_e \cdot L_m \quad \text{ecuación 1}$$

Donde:

L_p = Longitud del prototipo

L_m = longitud en el modelo

L_e = Escala

2.3.2. Similitud Cinética

Un modelo y un prototipo tienen similitud cinética si partículas homólogas llegan a puntos homólogos en tiempos homólogos. La relación de velocidades entre puntos debe ser constante y se denominada escala de velocidades. Es un requisito que se cumpla con la similitud geométrica para que se cumpla la similitud cinemática.

$$V_e = \frac{V_p}{V_m} \quad \text{ecuación 2}$$

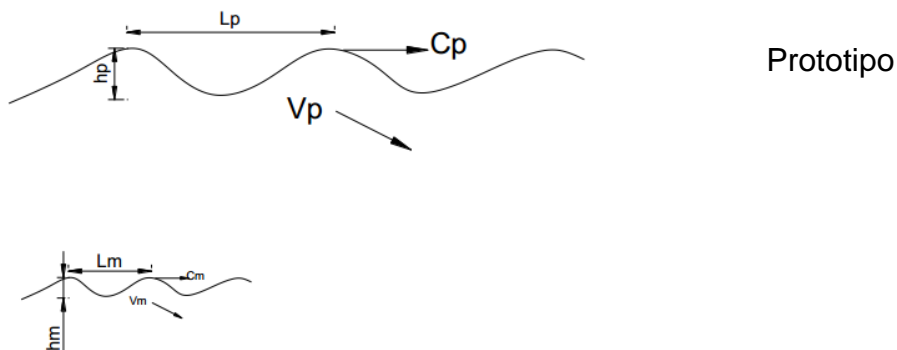
$$T_e = \frac{T_p}{T_m} \quad \text{ecuación 3}$$

Donde:

V_e = escala de velocidades

T_e = escala de tiempos

El cumplimiento de este tipo de semejanza obliga a que haya similitud geométrica; cuando ambas se cumplen, las direcciones del flujo en puntos homólogos del prototipo y modelo son semejantes, es decir, la forma de las líneas de corriente es la misma en modelo y prototipo (Canizalez Casillas,R).





Modelo

Figura 2-1. Similitud Cinética

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

$$a_e = \frac{a_p}{a_m} = \frac{V_e}{T_e} \quad \text{ecuación 4}$$

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

2.3.3. Similitud Dinámica

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

Para que se cumpla la similitud dinámica se debe cumplir también la geométrica y cinética. Las fuerzas que actúan sobre una partícula de fluido pueden ser debido a la gravedad F_g , a la presión F_p , a la viscosidad F_v y a la tensión superficial F_σ .

$$F_g = m \cdot g = \rho \cdot L^3 \cdot g \quad \text{ecuación 5}$$

$$F_p = \Delta p \cdot A \quad \text{ecuación 6}$$

$$F_v = \mu \cdot V \cdot L \quad \text{ecuación 7}$$

$$F_\sigma = \sigma \cdot L \quad \text{ecuación 8}$$

$$F_I = m \cdot a = \rho \cdot L^3 \cdot L/T = \rho \cdot V^2 \cdot L^2 \quad \text{ecuación 9}$$

La semejanza dinámica implica que se cumpla:

$$F_e = \frac{F_{g_p}}{F_{g_m}} = \frac{F_{p_p}}{F_{p_m}} = \frac{F_{v_p}}{F_{v_m}} = \frac{F_{I_p}}{F_{I_m}} = \frac{F_{\sigma_p}}{F_{\sigma_m}} \quad \text{ecuación 10}$$



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

$$\frac{F_{I_p}}{F_{g_p}} = \frac{F_{I_m}}{F_{g_m}}$$

ecuación 11

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

$$\frac{F_{I_p}}{F_{v_p}} = \frac{F_{I_m}}{F_{v_m}}$$

ecuación 12

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

$$\frac{F_{I_p}}{F_{p_p}} = \frac{F_{I_m}}{F_{p_m}}$$

ecuación 13

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

2.3.4. Leyes de Similitud Dinámica

2.3.4.1. Condición de Froude

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

Cuando las fuerzas de gravedad e inercia son las únicas a considerar se cumple la Ecuación 11 y considerando las expresiones de esas fuerzas dadas por las ecuaciones 9 y 5 tanto para modelo como para prototipo, se establece que:

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

ecuación 14

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



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

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

ecuación 15

Donde:

L_p, L_m = Dimensión característica del prototipo y modelo.

V_p, V_m = velocidad media del prototipo y del modelo.

g_p, g_m = gravedad del prototipo y del modelo.

La mayoría de los modelos en que se estudian obras hidráulicas, cumplen con la condición de Froude, tales como: obras de excedencia, captaciones, disipadores de energía, flujo en canales y ríos y comportamiento de obras que se construyen en ellos.

2.3.5. Consideraciones para seleccionar la Escala

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

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

Los modelos de vertederos, conductos y otras estructuras que tengan superficies relativamente suaves, las escalas varían entre 1:50 a 1:15 (distancia en el modelo: distancia en el prototipo) estos modelos nunca deben distorsionarse (French, R., 1988).

2.3.6. Efectos de Escala

Es el error en que se incurre al utilizar el modelo según una ley determinante principal e ignorar las otras. Los efectos de escala pueden definirse como las

distorsiones introducidas por efectos de gravedad, viscosidad, tensión superficial, etc. diferentes del que predomina. Esto ocurre cuando uno o más parámetros adimensionales son diferentes entre el modelo y el prototipo. Es decir, errores que resultan al modelar el prototipo con base en escalas escogidas para satisfacer la acción de la fuerza dominante y permitir que las otras fuerzas no estén a escalas. Los modelos geoméricamente similares casi siempre introducen inevitablemente algún grado de distorsión del flujo y algunos efectos de escala.

2.4. Compuertas Radiales o Taintor

Las compuertas son estructuras de control de flujo que descargan por debajo de la misma, funcionando como un orificio. Existen dos aspectos relevantes en el diseño de una compuerta: la relación altura-caudal, y la distribución de presiones sobre las superficie de la compuerta en diferentes posiciones y formas del labio. La forma del labio no solo afectará las distribuciones de velocidades, presiones y la pérdida de flujo a través de la abertura de la compuertas, sino que también desarrollará vibraciones muy importantes que deberán evitarse durante la operación.

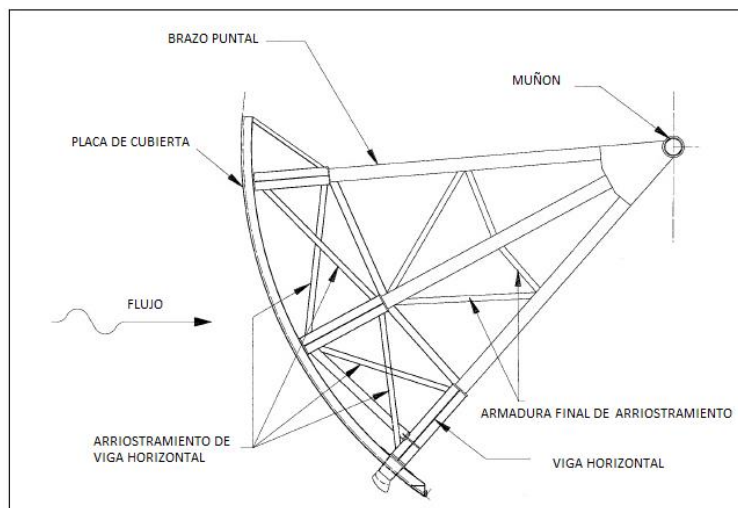


Figura 2-2. DESIGN OF SPILLWAY TAINTOR GATES (U.S. Army Corps of Engineers, 2000)

Mediante la ecuación de energía puede demostrarse que el caudal a través de una compuerta puede expresarse como:

$$Q = C_d b a \sqrt{2g(H + \alpha \frac{V_1^2}{2g})} \quad \text{ecuación 16}$$

Donde:

C_d = coeficiente de descarga.

b = ancho de la compuerta.

a = abertura de la compuerta

H = altura del calado aguas arriba de la compuerta.

$\propto \frac{V_1^2}{2g}$ = Altura de velocidad de flujo de aproximación

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

El flujo a la salida de la compuerta puede ser libre o sumergido, según la profundidad de salida. Para flujo sumergido, la altura de calado aguas arriba (H) de la ecuación 16 debe reemplazarse por la altura efectiva (H') que es la diferencia de profundidades entre aguas arriba y aguas abajo ($H'=H-y_2$).

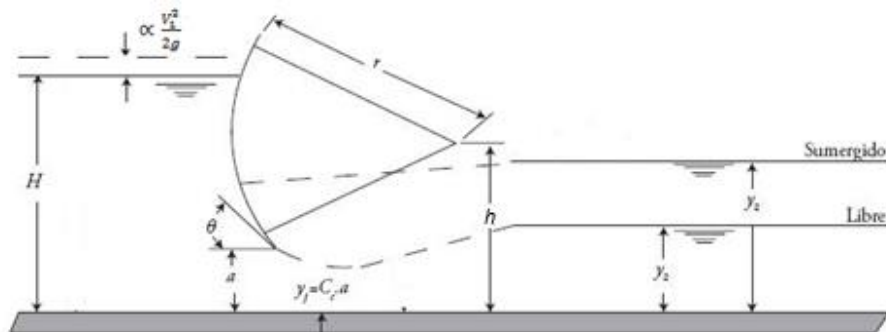


Figura 2-3. Flujo a través de compuertas (libre y sumergido)

Siendo h la altura del eje de la compuerta o altura del Muñón y θ el ángulo de abertura entre la compuerta y la horizontal.

Para estudios experimentales, el termino de altura de velocidad en la ecuación 15 puede omitirse y su efecto puede incluirse en el coeficiente C_d , resultando la ecuación 17:

$$Q = C_d b a \sqrt{2gH} \quad \text{ecuación 17}$$

Donde C_d dependerá de la geometría de la estructura y de las profundidades aguas arriba y aguas abajo.

Las experiencias de Arthur Toch son una de las más completas en lo que se refiere a compuertas radiales o Taintor pues incluye el caso de descarga sumergida. En la figura 2-4 se presentan los valores de coeficiente de descarga obtenidos por Toch los cuales se han relacionado con H/r , a/r , y_2/r para cada valor de h/r tanto en descarga libre como en sumergida.

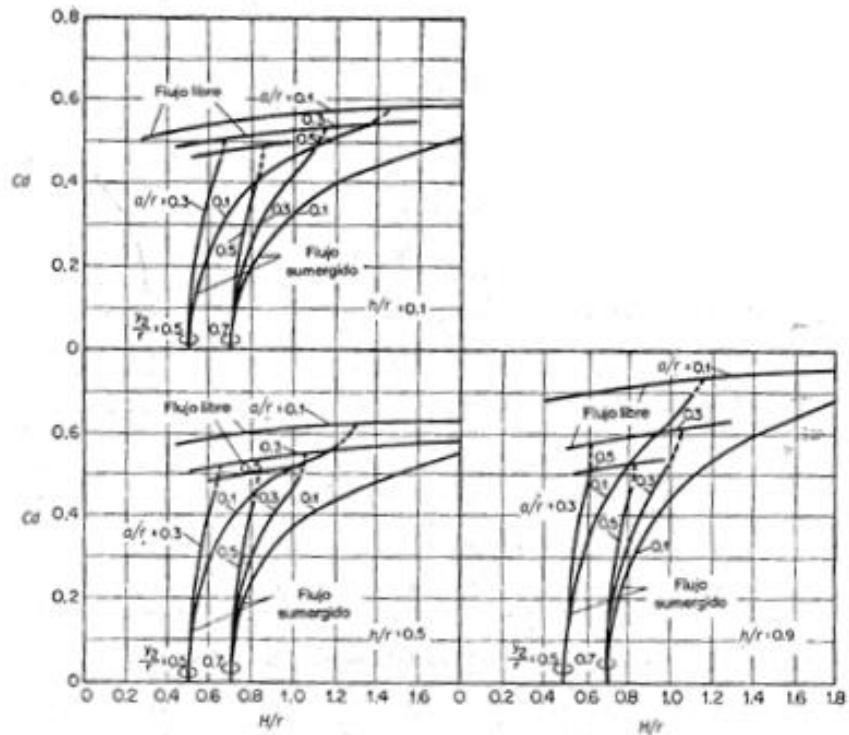


Figura 2-4. Coeficientes de descarga para compuertas radiales según A.Toch

En la figura 2-5 se observan los valores de los coeficientes de descarga para una compuerta radial obtenidos experimentalmente por Gentilini (Naudascher,2000). Las mediciones realizadas demostraron que se pueden remplazar los parámetros h/H y r/h por uno solo: el ángulo θ que forma la inclinación de salida del flujo con la horizontal.

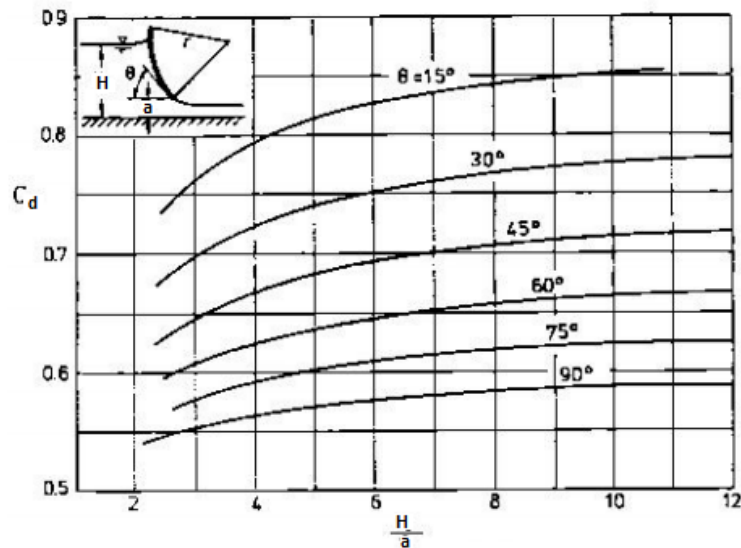


Figura 2-5. Coeficiente de descarga de compuertas radiales para flujos libres según Gentilini

El flujo de salida de una compuerta a menudo constituye un chorro de alta velocidad, capaz de erosionar el lecho del canal aguas abajo. La erosión puede evitarse por medio de la utilización de un cuenco disipador. Si no se dan medidas preventivas, la erosión puede originar un cuenco de socavación profundo y su formación dependerá del tipo de chorro que se presente.

2.5. DISIPACION DE ENERGIA

2.5.1. Introducción

Cuando el agua pasa por las compuertas radiales, la carga estática del nivel de agua en el embalse se convierte en energía cinética. Esta energía se manifiesta en la forma de altas velocidades que si se trata de disminuirlas producen grandes presiones. Por lo tanto, generalmente deben disponerse medios que permitan descargar el agua en el río sin erosiones o socavaciones peligrosas en la obra y que no produzcan daño en las estructuras adyacentes. En algunos casos, la descarga se puede hacer a altas velocidades directamente en la corriente en la que sea absorbe la energía a lo largo del cauce por impacto, turbulencia y rozamiento. Este método es satisfactorio cuando existe roca firme con tirantes de poca profundidad en el canal (USBR). Cuando no se puede tolerar la erosión es necesario construir un estanque artificial que permita la formación del resalto hidráulico que es a la final el que produce la disipación de energía. Este estanque se denomina Cuenco Disipador.

2.5.2. Análisis del Resalto Hidráulico

La transición de flujo supercrítico ($F > 1$) a subcrítico ($F < 1$) se conoce como “Resalto Hidráulico” y se caracteriza por el desarrollo de turbulencia de gran escala, por ondas superficiales y por rocío, así como por la disipación de energía y entrapamiento de aire.

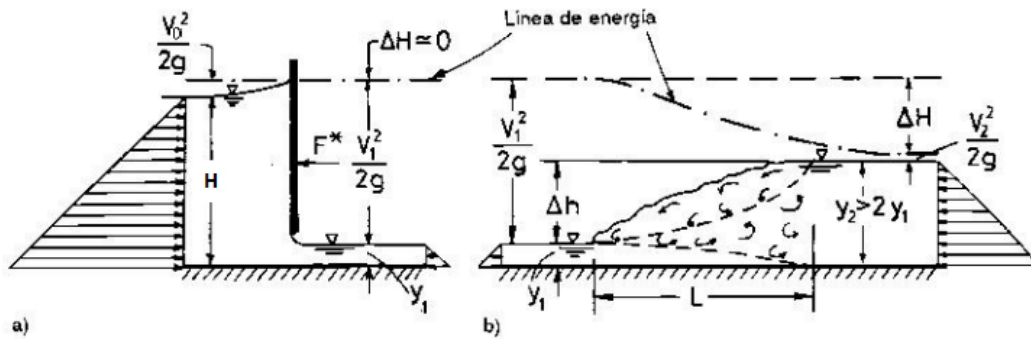


Figura 2-6. Cambios de Régimen. a) De subcrítico a supercrítico. b) de supercrítico a subcrítico (resalto hidráulico)

La región de turbulencia de gran escala se conoce como “remolino”. Un resalto hidráulico es una región de flujo de variación rápida y se formará en el canal si el número de Froude F_1 del flujo, la profundidad contraída del flujo Y_1 y la profundidad Y_2 seciente aguas abajo satisfacen la ecuación de Belenger (ver ecuación 18) para canales con sección rectangular que considera un caudal específico constante y pendiente horizontal.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \quad \text{ecuación 18}$$

2.5.3. Tipos de Resalto hidráulico

Existen diferentes tipos de resalto hidráulico en canales horizontales, cuya base de clasificación es el número de Froude aguas arriba antes que se produzca el resalto F_1 . (ver Figura 2-7)

- Flujo Crítico ($F_1=1$): no se forma ningún resalto.
- Resalto Ondulante ($F_1= 1$ a 1.7): la superficie de agua presenta la tendencia a la formación de ondulaciones. Pérdidas de energía insignificantes.
- Resalto Débil ($F_1=1.7$ a 2.5): Se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme. La velocidad a través de la sección es uniforme y la pérdida de energía es baja.

- d) Resalto oscilante inestable ($F_1 = 2.5$ a 4.5): Se producen ondas largas de periodo irregular. Cada oscilación irregular produce una ola grande la cual viaja lejos hacia aguas abajo, dañando y erosionando las orillas.
- e) Resalto Estable ($F_1 = 4.5$ a 9): La extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado y su comportamiento es el mejor. La disipación de energía varía de 45% a 70%.
- f) Resalto Fuerte ($F_1 > 9$): El chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo, y puede prevalecer una superficie rugosa. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85%.

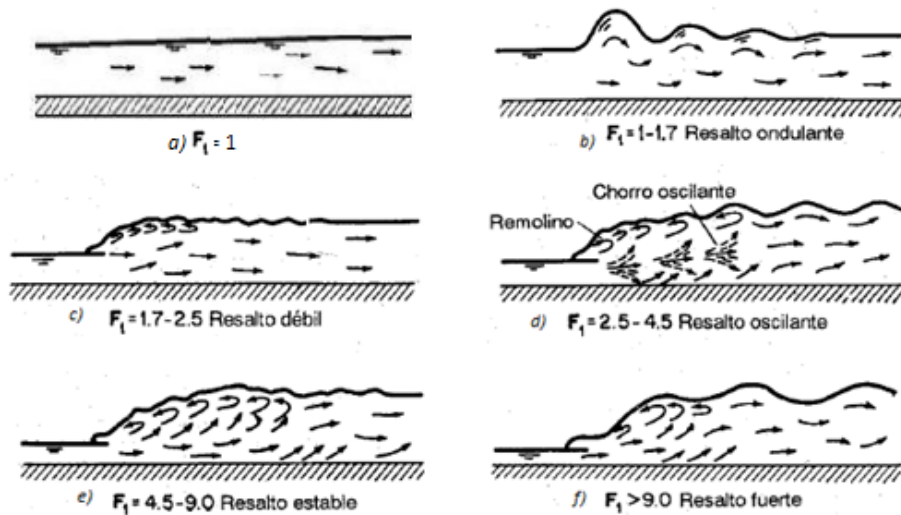


Figura 2-7. tipos de resalto (chow, 2004)

2.5.4. Longitud del resalto hidráulico

La longitud del resalto hidráulico (L_r) se define como la distancia entre la cara frontal del inicio del resalto, hasta un punto inmediato donde finaliza. Esta longitud se ha determinado en forma experimental, en base a las alturas, antes y después del resalto. De todos los datos experimentales sobre la longitud del resalto, la curva F_1 versus L_r/y_2 es la más conveniente debido a que la curva resultante muestra la regularidad de una parte plana para el rango de los resaltos bien

establecidos. En la Figura 2-8 se muestra una curva F versus Lr/y_2 basada en los datos experimentales de seis canaletas de prueba realizadas por la USBR.

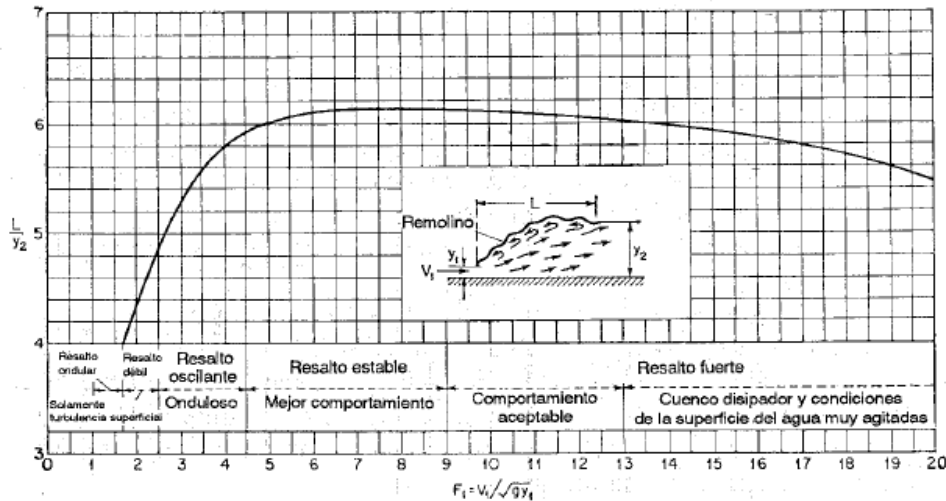


Figura 2-8. Longitud de Resalto en términos de profundidad secante y_2 en canales horizontales según la USBR (chow, 2004)

Adicionalmente se pueden utilizar las siguientes ecuaciones para calcular la longitud del Resalto:

Paulosky $Lr = 2,5 (1,9Y_2 - Y_1)$ **ecuación 19**

Silvester $Lr = 9,75 Y_1 (Y_2 - 1)^{1,01}$ **ecuación 20**

Chertousov $Lr = 10,3 Y_1 (F - 1)^{0,81}$ **ecuación 21**

2.5.5. Características básicas del resalto

2.5.5.1. Pérdidas de Energía

Se define como la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto.

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(Y_2 - Y_1)^2}{4Y_1Y_2}$$
 ecuación 22

La relación $\Delta E/E_1$ se conoce como pérdida relativa.

2.5.5.2. Eficiencia

Es la relación entre la energía específica antes y después del resalto.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{\frac{3}{2}} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)}$$

ecuación 23

2.5.5.3. Altura del resalto

La diferencia entre las profundidades antes y después del resalto: $h_j = y_2 - y_1$

Con estas características dibujadas se obtienen las curvas características del resalto hidráulico. (ver Figura 2-9)

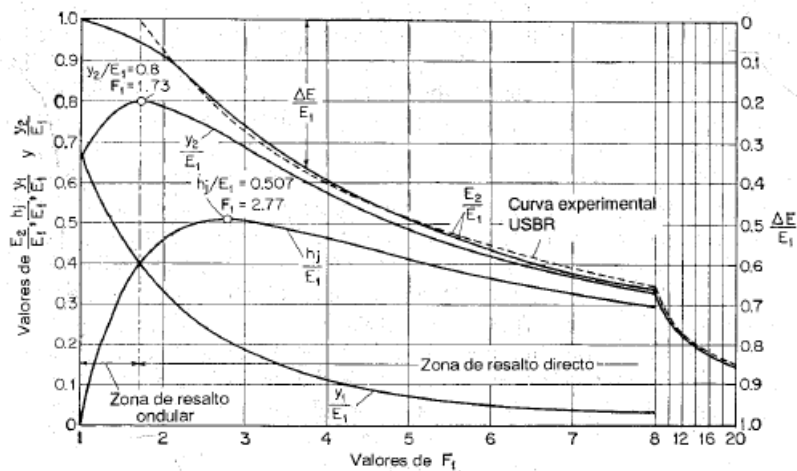


Figura 2-9. curvas características del resalto hidráulico (chow, 2004)

Estas curvas características darán una idea clara del rango de condiciones a las cuales la estructura debe operar.

2.5.6. Perfil del Resalto Hidráulico

El conocimiento del perfil de la superficie libre de un resalto hidráulico es necesario en el diseño del borde libre para los muros laterales del cuenco disipador donde se presenta el resalto.

También es importante para determinar las presiones en el fondo del cuenco ya que estas son las que rigen el diseño estructural, experimentalmente se ha comprobado que la presión sobre el fondo del cuenco es prácticamente la misma que indica el perfil de la superficie libre del agua.

El perfil superficial de un resalto hidráulico puede representarse mediante curvas adimensionales para varios valores de numero de Froude (F_1) como se muestra a continuación. (ver Figura 2-10)

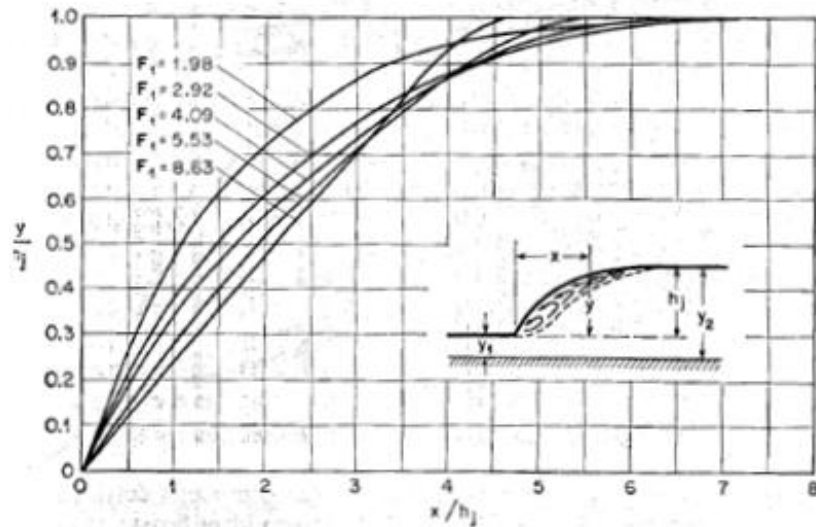


Figura 2-10. perfiles superficiales adimensionales de resaltos hidráulicos (ven te Chow, 2004)

2.6. Cuenco Disipador

El resalto hidráulico utilizado para la disipación de energía a menudo se confina parcial o totalmente en un tramo del canal que se conoce como cuenco de disipación cuyo fondo se recubre para resistir la socavación. En la práctica, el cuenco disipador rara vez se diseña para confinar toda la longitud de un resalto sobre la zona revestida, debido a que sería muy costoso. En consecuencia, a menudo se instalan accesorios para controlar el resalto dentro del cuenco como bloques de impacto y umbrales de salida. El principal propósito de este control es acortar el rango dentro del cual ocurrirá el resalto, y por consiguiente reducir el tamaño y el costo del cuenco disipador.

El principal daño que se debe evitar, es la socavación y cavitación del cuenco disipador y del lecho natural del Río aguas abajo.

2.6.1. Tipos de Cuencos disipadores

Estructuras Normalizadas

Estas estructuras muestran como característica que las dimensiones se fijan en función del número de Froude del flujo entrante (F_1) y de los calados conjugados



(Y_1, Y_2) , sin embargo no se puede asegurar su óptimo funcionamiento sin antes haberlo ensayado en modelos hidráulicos a escala.

- Cuenco disipador SAF (San Anthony Falls)

Está recomendada para uso en pequeñas estructuras como vertederos, obras de salida y estructuras de canal que tengan como característica un número de Froude comprendido entre $F_1=1,7$ a $F_1=17$. La reducción de la longitud es alrededor de 80%.

La longitud L_B para el cuenco disipador se determina mediante:

$$L_B = \frac{4,5 Y_2}{F_1^{0,76}} \quad \text{ecuación 24}$$

La altura de los bloques de entrada y los del piso es igual a Y_1 y su ancho y espaciado es aproximadamente $0,75Y_1$.

La distancia desde el extremo de aguas arriba del cuenco disipador hasta los bloques del piso es $L_B/3$.

No se deben localizar bloques en el piso más cerca de las paredes laterales que $3Y_1/8$.

Los bloques del piso deben localizarse aguas abajo enfrentados a las aberturas entre los bloques de la rápida.

Los bloques del piso deben ocupar entre el 40% y 55% del cuenco del disipador.

Los anchos y espaciados de los bloques del piso para cuencos disipadores divergentes deben incrementarse en proporción al aumento del ancho del cuenco disipador en la sección donde se localizan los bloques.

La altura del umbral de salida está dada por $c = 0,07Y_2$, donde Y_2 es la profundidad secuente teórica correspondiente a Y_1 .

La profundidad de salida aguas abajo por encima del piso del cuenco disipador está dada por:

$$Y_2' = \left(1,1 - \frac{F_1^2}{120}\right) Y_2 ; \quad \text{Para } F_1=1.7 - 5.5 \quad \text{ecuación 25}$$

$$Y_2' = 0,85 Y_2 \quad \text{Para } F_1=5.5 - 11 \quad \text{ecuación 26}$$



$$Y_2' = \left(1,0 - \frac{F_1^2}{800}\right) Y_2$$

Para $F_1=11 - 17$

ecuación 27

La altura de los muros laterales por encima de la profundidad de salida máxima esperada dentro de la vida útil de la estructura está dada por $z=Y_2/3$.

Los muros de salida deben ser iguales en altura a los muros laterales del cuenco disipador, y su parte superior debe tener una pendiente 1:1.

El muro de salida debe localizarse con un ángulo de 45° con respecto al eje central de salida.

Los muros laterales del cuenco disipador pueden ser paralelos, como en un cuenco disipador rectangular, o divergir como una extensión de los muros laterales de la transición, como en un cuenco disipador trapezoidal.

Debe usarse un muro cortina de profundidad nominal en el extremo del cuenco disipador.

El efecto de atrapamiento de aire no se considera en el diseño del cuenco disipador.

En la Figura 2-11 se detallan de mejor manera los parámetros de diseño descritos:

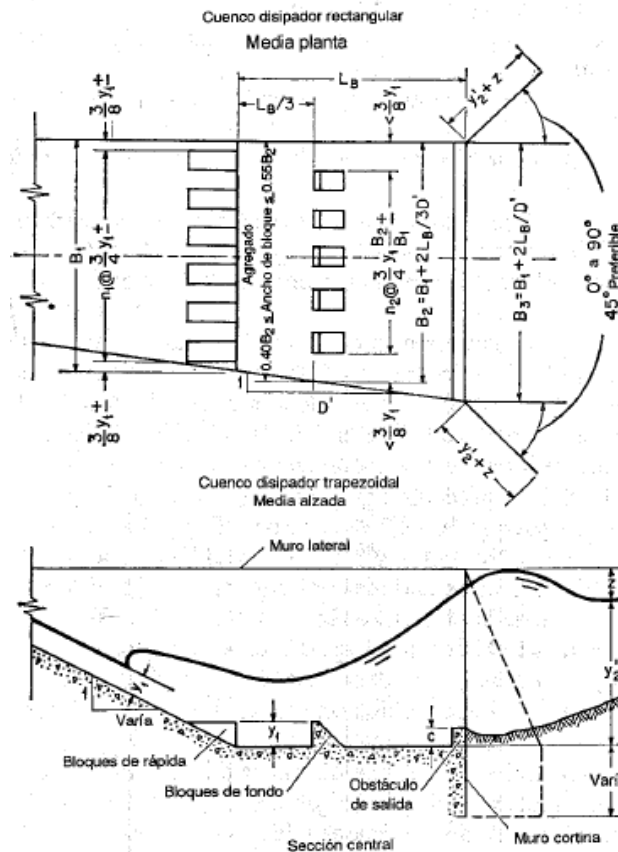


Figura 2-11. Dimensiones del cuenco SAF (Chow, 2004)

Estructuras del Bureau of Reclamation (USBR)

Muchas han sido las estructuras desarrolladas, ensayadas y perfeccionadas por el laboratorio del Bureau of Reclamation en Denver, Colorado, USA; siendo las más importantes aquellas que se presentan a continuación:

- **Cuenco I (Resalto Hidráulico en Plataformas Horizontales)**

Este cuenco se ha diseñado para un resalto sobre un piso plano, corresponde a las condiciones de disipación del resalto hidráulico clásico. A continuación se describe el diseño típico de este cuenco.

Su campo de aplicación vienen dado para una altura de caída $H > 60$ m, para caudales unitarios mayores $q > 45 \text{ m}^2/\text{s}$ y para números de froude de las características $4.5 \leq F_1 \leq 9$.

La longitud del cuenco disipador es aproximadamente $L \approx 6Y_2$.

Esta estructura no es muy práctica ya que su longitud es demasiado grande y por la falta de control que presenta.

Las condiciones de este cuenco I, son las mismas que se expuso anteriormente en la teoría de resalto hidráulico (ver apartado 2.5).

- **Cuenco II (Para Vertederos de Presas Altas y grandes Estructuras de Canal)**

Este es un cuenco provisto de dados en la rampa de aproximación y un umbral final dentado. No se utilizan bloques de impacto en la cubeta ya que las altas velocidades podrían causar cavitación.

El campo de aplicación para este cuenco es que el número de froude sea $F_1 > 4,5$, para un caudal unitario $q > 46 \text{ m}^2/\text{s}$, para alturas de caída $H < 60\text{m}$ y velocidades de aproximación $V_1 > 15 \text{ m/s}$.

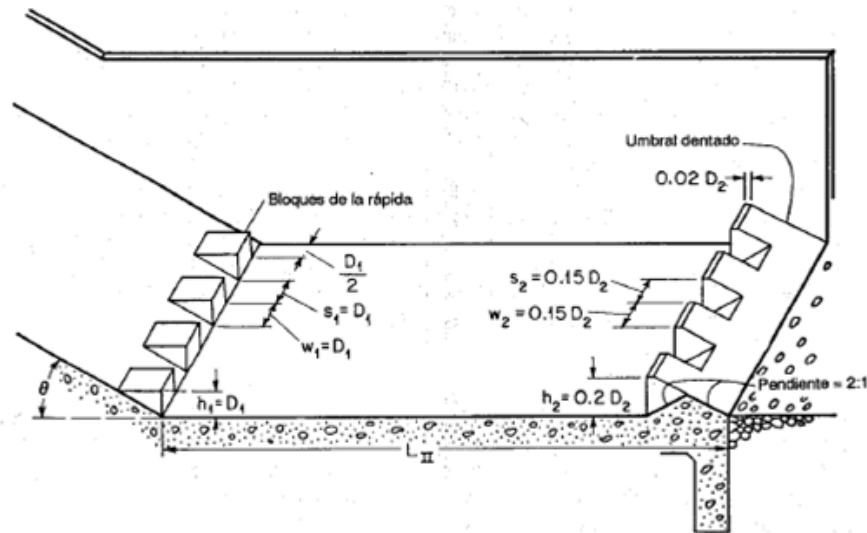


Figura 2-12. dimensiones del cuenco USBR II (hidráulica de canales abiertos, chow)

La altura de los bloques de la rampa es igual a la profundidad de la entrada del flujo al cuenco, D_1 (Y_1), el ancho y espaciamiento aproximadamente D_1 (Y_1), pero puede variar para eliminar fracciones de bloques. Junto a cada muro de ala es mejor un bloque de $D_1/2$ ($Y_1/2$) de ancho.

La altura del diente del umbral es $0,2 D_2$ (Y_2) y el ancho máximo recomendado es $0,15 D_2$ (Y_2). Se recomienda que un diente sea colocado adyacente al muro de ala.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

La pendiente para la parte posterior del umbral es 2:1, para cuencos estrechos es recomendable reducir el ancho y espaciamiento de los dientes.

No es necesario escalonar los dientes de la rampa con los del umbral.

En el cuenco II, no hay cambios perceptibles en el funcionamiento del cuenco, es decir no hay cambios en el resalto hidráulico cuando se varía la pendiente de la rampa de 0,6:1 a 2:1.

Se recomienda que la unión de la rampa y la plataforma sea por medio de una curva de radio razonable ($R \geq 4Y_1$) cuando la pendiente de la rampa es 1:1 o mayor.

La longitud del cuenco está dada aproximadamente por $L \approx 4.2Y_2$ ó a su vez puede ser determinado por una gráfico que viene dado en función de L/Y_2 y el número de Froude F_1 (ver Figura 2-8):

En cuencos angostos es recomendable reducir el ancho y espaciamiento de los dentados, proporcionalmente, para aumentar el número de éstos y de esta manera mejorar el rendimiento del cuenco. No es necesario colocar en forma alternada los bloques de rampa y los umbrales dentados.

- **Cuenco III (Cuenco Corto para Estructuras en Canales para Pequeñas Descargas y Pequeños Vertederos)**

Ha sido diseñado para un propósito similar al de la estructura SAF, pero considerando un factor de seguridad más alto ya que reduce la longitud del resalto en un 60%, está provisto de bloques de rampa, bloques de impacto en la cubeta y un umbral final continuo.

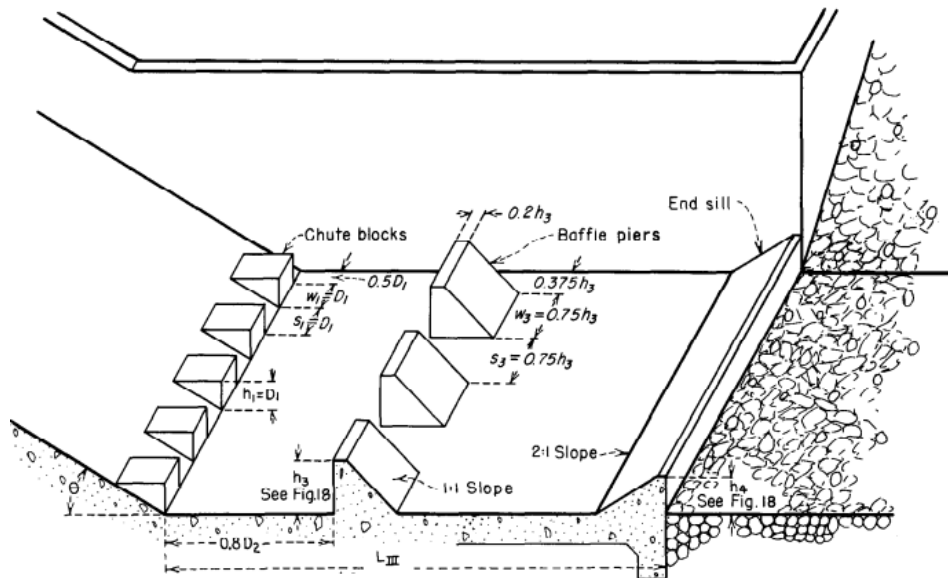


Figura 2-13. Dimensiones del cuenco USBR III

Esta estructura tiene como características fundamentales:

Las velocidades a la entrada del cuenco son moderadas o bajas, (hasta 15-18 m/s) y descargas unitarias de hasta $19\text{m}^2/\text{s}$.

La forma más efectiva de obtener un cuenco pequeño es modificar el resalto por medio de accesorios, que deben ser autolimpiables.

El cuenco opera mejor con la profundidad completa conjugada al final del resalto, D_2 (Y_2), un factor de seguridad razonable debe ser inherente en la profundidad de agua para todos los números de Froude.

La longitud del cuenco es menor que la mitad de la longitud de un resalto natural y se obtiene de la Figura 2-8 mostrado anteriormente.

El cuenco tipo III puede ser efectivo para números de Froude menores que 4, pero no es una certeza.

La altura, ancho y espaciamiento de los bloques de la rampa, debe ser igual al promedio de la profundidad de entrada del flujo al cuenco, D_1 (Y_1).

La altura de los dientes deflectores varía con respecto al número de Froude.

La cara aguas arriba del diente deflector debe fijarse a una distancia $0,8 D_2$ (Y_2) de la cara aguas debajo de los bloques de la rampa.

La altura del umbral sólido al final del cuenco debe ser según la siguiente figura:

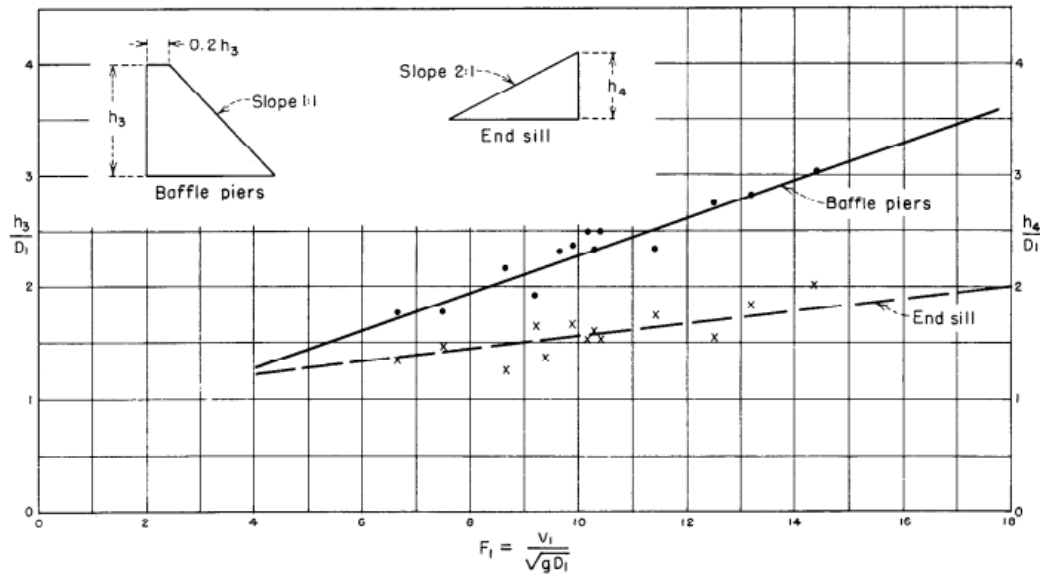


Figura 2-14. Gráfico para determinación de las dimensiones de los bloques de impacto y umbral final

No es recomendable redondear ó aerodinamizar las esquinas de los bloques de la rampa, umbral del final o dientes deflectores, ya que podría resultar en la pérdida de la mitad de eficiencia.

Es recomendable un radio de intersección $R \geq 4D_1$ (Y_1) para la plataforma y rampa, cuando hay ángulos de 45° o más.

La pendiente de la rampa tiene muy poco efecto en el resalto, a menos que largas pendientes planas estén involucradas.

- **Cuenco IV (Cuencos disipadores para estructuras de canal y descargas)**

Conciérne al resalto hidráulico para números de Froude entre 2,5 y 4,5.

El mayor problema es causado por las ondas que producen que el resalto hidráulico no sea estable.

La colocación de bloques largos es necesario en la rampa, con el objeto de dirigir el chorro dentro de la base del remolino en un intento de fortalecerlo y de este modo estabilizar el resalto. Los bloques con la parte superior curva mejoran el resalto.

Es importante no colocar muchos accesorios ya que podría producirse un problema de remanso, requiriéndose así altos muros de ala. La superficie de los bloques debe tener una pendiente de 5° hacia abajo.

Una profundidad de agua de 5% a 10% mayor que la profundidad conjugada es recomendada para Cuenco IV. El desarrollo del resalto es mucho mejor y la acción de las ondas se disminuye si la profundidad aguas abajo se incrementa en aproximadamente $1,1 D_2 (Y_2)$.

Para un comportamiento hidráulico mejor es conveniente construir estos bloques mas angostos que lo indicado en la Figura 2-15 preferiblemente con un ancho igual a $0,75 D_1 (Y_1)$. Un pequeño umbral al final de la plataforma es deseado para evitar la socavación.

Los cuencos tipo IV son aplicables solo para secciones rectangulares.

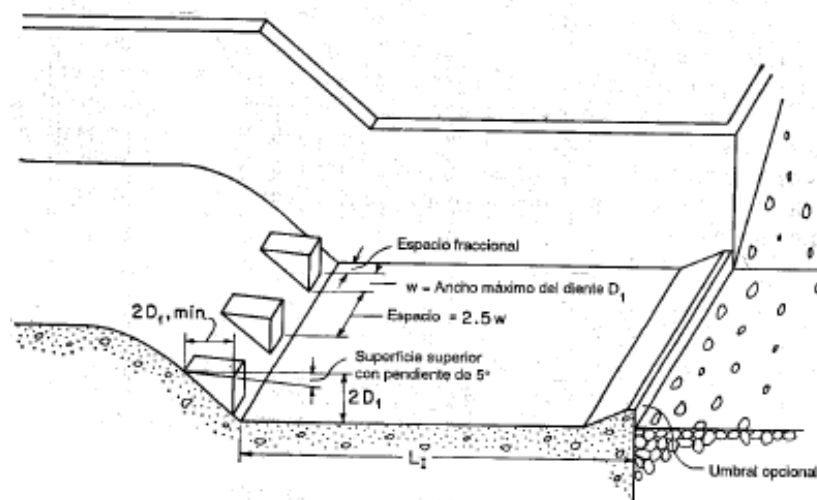


Figura 2-15. dimensiones del cuenco IV USBR

CAPITULO 3

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Metodología General de Estudio.

El Método de estudio consta de dos fases. La primera fase fue desarrollada en el modelo físico de la estructura de captación, construida en el laboratorio de modelación Hidráulica del PROMAS e implementada junto con el modelo del Rio Negro, y cuyos ensayos preliminares nos permitieron evaluar e identificar los problemas relacionados con la disipación de energía debido a la descarga del flujo a través de las compuerta en el diseño original.



Identificados los problemas en la disipación de energía, se presentaron alternativas de diseño para la estructura, iniciando así la segunda fase del estudio correspondiente a los ensayos propiamente realizados en los modelos de las alternativas de disipación propuestas.

Esta segunda fase de estudio se lo realizó completamente en el canal de laboratorio de hidráulica de la Universidad de Cuenca debido a la facilidad en la observación de los parámetros relacionados con la disipación de energía así como en la facilidad de la toma de datos y manipulación de los modelos alternativos construidos.

Se debe mencionar que previo al estudio y experimentación tanto de la estructura de captación como en los modelos alternativos de los disipadores de energía, se realizaron ensayos de calibración de la compuerta, los cuales se indican más adelante.

3.2. Descripción General del Proyecto Hidroeléctrico San Bartolo

El proyecto "Hidro San Bartolo" comprende una central de generación hidroeléctrica de pasada con una potencia de generación aproximada de 48,07 Megavatios (MW), y que generará alrededor de 350 Gigavatios (GW) por año, con un factor de planta del 83,25%. Los principales elementos del proyecto comprenden una presa de derivación de poca altura, la estructura de captación de agua, tuberías de acero, tubería de presión, una central eléctrica de superficie, una línea de transmisión y una subestación eléctrica.

Obra de Toma: La captación es de tipo convencional y captará un caudal de $30 \text{ m}^3/\text{seg}$. Cuenta con un azud de 19,5m de ancho y una altura de 12,8m en el prototipo, tres compuertas que serán utilizadas en eventos de crecida para la evacuación de caudal con una abertura de 7 m y un ancho de 6m en el prototipo, una compuerta de lavado de 4m de ancho y 5m de abertura máxima en el prototipo, que está conectada a un canal para el desalojo de sedimentos con una pendiente del 4 % y una longitud total de 80m que desemboca aguas abajo de la obra.

Estas compuertas devuelven el flujo de agua al río mediante unos canales que tienen la función de disipar la energía provocada por las altas velocidades que se producen en la descarga. Las dimensiones de estos disipadores se muestran en los planos generales del Anexo A.4.

Obra de conducción: La conducción está conformada por un tramo inicial de canal embaulado con 800m de longitud, continuando con un tramo formado de una tubería circular hasta alcanzar la casa de máquinas.

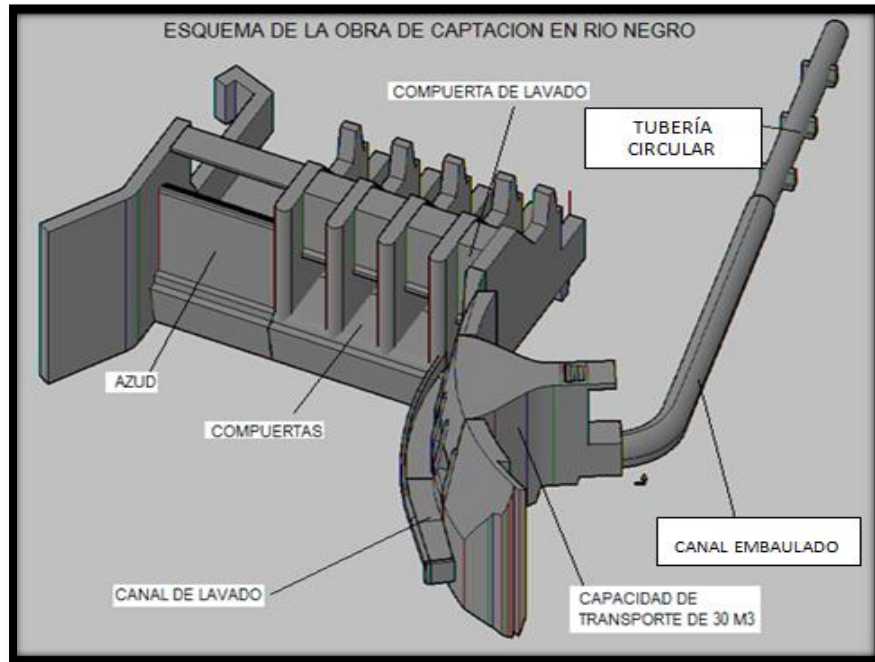


Figura 3-1. Esquema de la obra de captación y conducción para el proyecto hidroeléctrico “San Bartolo”

3.2.1. Ubicación del proyecto de obra de captación.

El proyecto está ubicado en el Cantón Santiago, Provincia de Morona Santiago, en la zona poblada de San Bartolo, teniendo como centros poblados próximos a Copal, San Bartolo, La delicia, La dolorosa entre otros. Las coordenadas del proyecto son 787741 – 9696202 (UTM WGS84 ZONA 17 S).

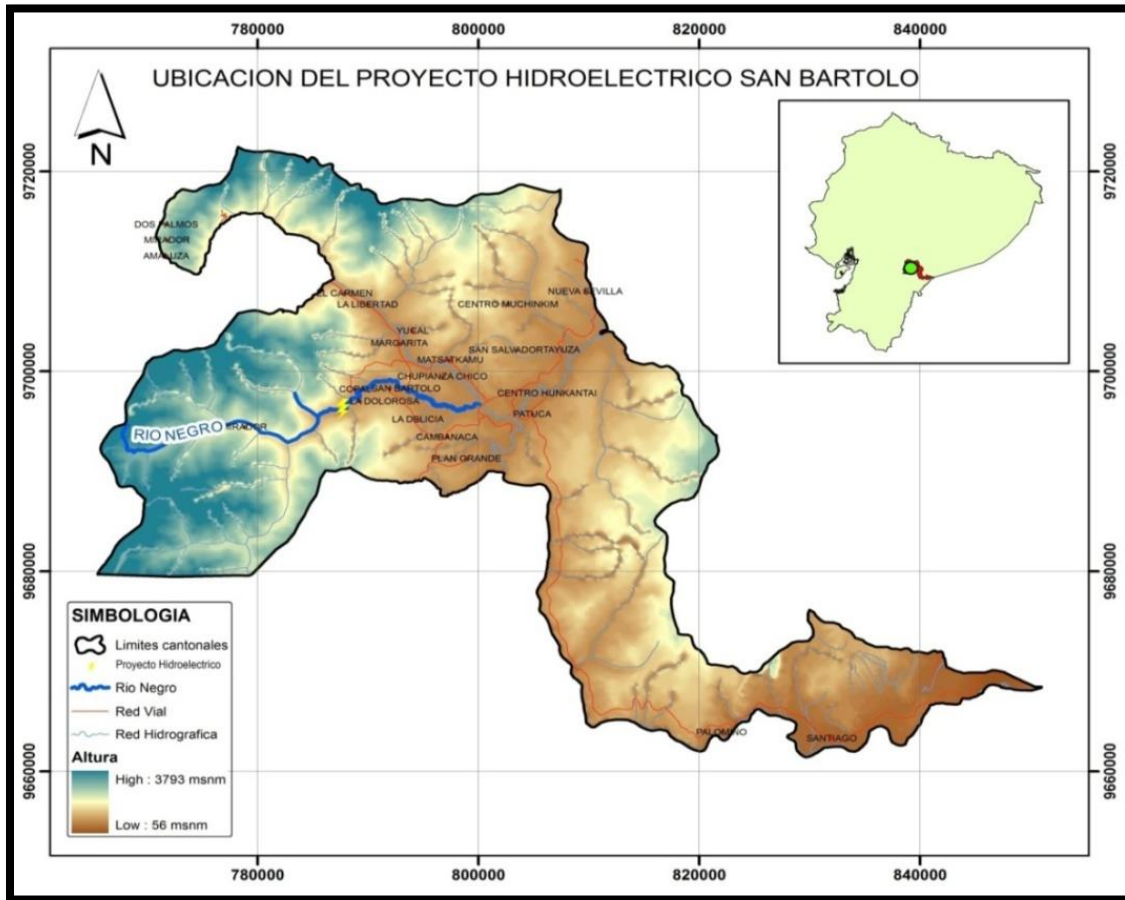


Figura 3-2 Ubicación del proyecto "Hidro San Bartolo"

3.3. Consideraciones generales para el Modelo del Rio Negro

3.3.1. Consideraciones Hidrológicas para el diseño.

Tomando en cuenta que el cauce en análisis corresponde a un río en dinámica de procesos erosivos y de transporte, se ha asociado estos fenómenos y los procesos de flujo a la hidrología de los eventos de regularidad hidrológica, y a la hidrología de eventos extremos como base para el análisis de los fenómenos asociados al transporte de carga de lecho en situaciones extremas.

- **Hidrología de caudales clasificados:**

Del resultado de los estudios hidrológicos definitivos (ver Tabla 3-1) se establece que la distribución de los valores medios mensuales para esta zona obedece al comportamiento de régimen amazónico, es decir con caudales mayores en la mitad del año. Al analizar la distribución de los caudales medios mensuales se permite establecer como adecuado el caudal medio anual y como el caudal



formativo del cauce, estableciéndose el valor de 50 m³/s para efecto de todos los estudios necesarios en el modelo físico.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Mínimo	19,8	19,2	21,0	22,5	27,7	31,9	47,0	21,2	25,1	22,0	19,5	19,1	35,4
Medio	29,4	37,2	45,7	60,4	64,6	73,1	76,6	59,7	48,0	41,2	34,7	31,2	49,3
Máximo	52,5	74,1	85,5	112,6	105,4	116,8	103,3	92,0	85,6	71,9	61,4	57,5	75,3

Tabla 3-1. Caudales Medios Mensuales en los Sitios de Toma del Aprovechamiento Copal - San Bartolo en m³/s (Tomado de Estudio En Modelo Hidráulico Para La Optimización Del Diseño De La Obra De Captación En El Río Negro Del Proyecto Hidroeléctrico Hidrosanbartolo. (Pacheco & Carrillo, 2012)

➤ **Consideraciones adicionales para el modelo**

Para la construcción, implementación y calibración del modelo se han considerado los grados de libertad para la planta, ancho (dentro de la limitación impuesta por la orografía del encauzamiento) y calado de flujo. A través de la observación de dichos parámetros se realizó el establecimiento del cauce base para el modelo, de tal manera que se pueda a futuro tomar en cuenta los aspectos de variación espacial y temporal en el tramo analizado.

Una aproximación al caudal formativo del cauce será necesaria con el fin de obtener un mejor entendimiento del comportamiento morfológico más representativo, antes de considerar el evento de la avenida de diseño. En consideración de la información hidrológica antes mencionada, se ha fijado un caudal dominante (caudal formativo) de 50 m³/s. Así mismo, y para efectos de identificación de otros caudales de interés, y para validación de los procesos, se ha considerado para la calibración inicial, caudales en el rango correspondiente a los medios anuales del periodo húmedo en el rango de 75 m³/s.

Para efectos de estudios y calibración en los componentes de la obra de captación como son las estructuras de compuertas, disipadores, azud, etc; además de considerar los caudales formativos y medios anuales del periodo húmedo, se ha considerado un caudal de crecida de 1200m³/s para un periodo de retorno de 100 años según los estudios hidrológicos.



➤ **Conceptualización para el Modelo**

El modelo implementado para la obra de captación del río Negro plantea un estudio (Pacheco & Carrillo, 2012) en lecho móvil a través del cual se ha inspeccionado las condiciones relevantes a:

Identificación de los efectos debidos a la configuración geométrica en planta prevista para la obra de captación.

- Proceso de transporte de sedimento y de depositación aguas arriba del cierre.
- Procesos de sedimento en suspensión.
- Caracterización de las condiciones hidráulicas de flujo relevantes para la obra (calados, distribución de velocidad).
- Identificación de obras complementarias para funcionamiento de la obra.
- Identificación de otros fenómenos hidráulicos que pudieran ser de interés para el diseño de la obra.

3.4. Equipamiento y laboratorio.

Como se indicó anteriormente, la construcción del modelo original de captación se lo realizó en el laboratorio de modelación hidráulica perteneciente al PROMAS (Programa de Manejo del Agua y del Suelo) donde se realizaron los ensayos preliminares de evaluación y funcionamiento de la estructura original de disipación de energía, pero adicionalmente fue necesario también la utilización del canal de Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Cuenca donde se realizaron propiamente los ensayos de alternativas propuestas para la disipación de energía. Ambos laboratorios utilizados se describen a continuación:

3.4.1. Laboratorio de modelación Hidráulica del PROMAS

En el laboratorio de modelación hidráulica se utilizó un canal fabricado de fibra de vidrio de dimensiones 15m de longitud por 5m de ancho y 0,70m de alto, equipado con un tanque de reserva tanto en la parte frontal como posterior del canal.

El tanque frontal cumple la función de recibir y almacenar el agua proveniente de la circulación en el modelo físico, y el tanque posterior se utiliza para recibir y almacenar la cantidad necesaria para realizar la experimentación. El tanque frontal cuenta con dos vertederos de pared delgada de 2,5m de ancho controlados con un sistema de regulación de flujo. El tanque posterior se encuentra habilitado con



UNIVERSIDAD DE CUENCA

un vertedero de pared delgada de 1,1m ancho y que constituye la puerta de entrada al modelo.

La recirculación del agua del tanque frontal al posterior se realiza con una bomba eléctrica (Tabla 3-2) que se encuentra acoplada a un sistema electrónico el cual permite controlar los caudales enviados a través del modelo. La capacidad máxima o volumen máximo de flujo proporcionada por la bomba eléctrica es de 80 l/s.

EL tanque cuenta con un sistema de recirculación constituido por una tubería con un diámetro de 6 pulgadas para la succión, acoplada con una válvula tipo check, y con una tubería de 4 pulgadas instalada con un sistema de válvulas en paralelo para la descarga con el fin de regular los caudales de flujo durante los diferentes observaciones o ensayos.

Especificaciones Bomba Eléctrica del Sistema	
Marca	BrookCrompton Parkinson Motors
Nº de serie	K826R
Potencia	15KW
Voltaje	220
RPM	1740
Amperaje	53

Tabla 3-2. Especificaciones bomba eléctrica del sistema (Pacheco & Carrillo, 2012)



Figura 3-3. a) línea de succión y descarga. b) tanques de reserva. c) equipo de bombeo

3.4.2. Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Cuenca.

El canal de laboratorio de hidráulica de la Universidad de Cuenca está compuesto por los siguientes elementos: Un soporte o base del canal, paredes del canal, tanques de salida y entrada y una bomba.

La estructura de soporte consiste de una celosía construida en acero y sección hueca. La base del canal es también de acero laminado y está asentada sobre la celosía mediante grandes tornillos de elevación ajustables. Este sistema permite que el canal sea adecuadamente y convenientemente alineado después de la instalación.

Las paredes laterales del canal son de vidrio templado y están soportadas por brazos de acero en voladizo independientemente ajustados, esto permite que se mantenga la correcta geometría de la sección transversal.

El tanque de ingreso presenta una malla y una zona de amortiguamiento y se conecta cuidadosamente con el canal mediante una transición lisa, lo cual garantiza la estabilidad en el flujo, además en el tanque de salida existe una compuerta, que permite mantener el nivel de agua.

Para la descarga existe un tubo alargado que permite aquietar el flujo descargado en el tanque de almacenamiento.

Los tanques de ingreso y de salida del canal son de GFRP, por sus siglas en inglés (Glass-Fiber Reinforced Plastic) o Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio.

La bomba que utiliza el canal es de Marca NECO (Normand Electrical Co.Ltd.) London and Portsmouth. Bomba centrífuga monoblock con caudal máximo de 23,5Lt/s, 1750 RPM.

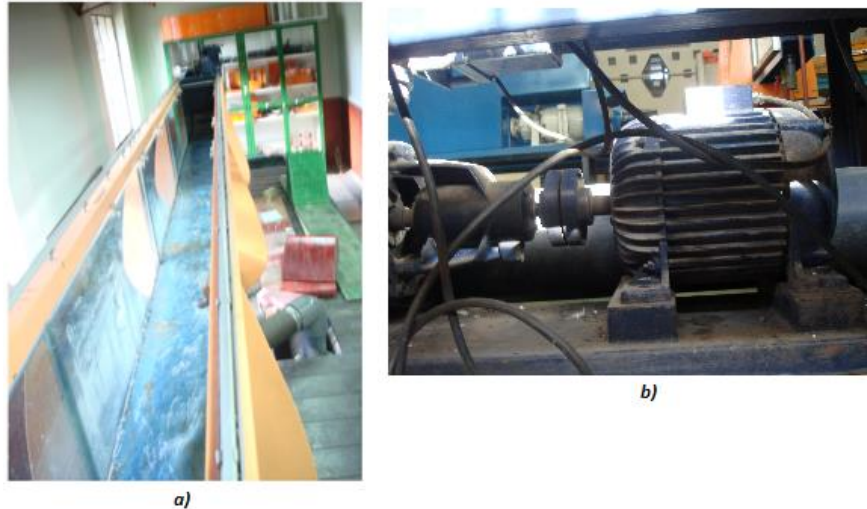


Figura 3-4. a) Canal Armiefld Tilting Flume S6. b) Bomba del canal

Finalmente se tiene que la marca del canal es ARMFIELD y sus dimensiones son :

- ancho =0,3m
- profundidad = 0,45m
- Longitud = 12,5m.

3.5. Descripción General del modelo físico Global

El modelo implementado, como se mencionó, es de lecho móvil ya que este nos ofrece la ventaja de simular los efectos característicos de la hidráulica fluvial o de corrientes aluviales, como son los efectos de erosión y depositación producidos por el fenómeno de transporte de sedimentos.

Para el emplazamiento del modelo en el tanque se utilizó una escala no distorsionada de 1:50 ya que las características de espacio disponibles en el laboratorio así lo permiten. La escala embarca un área de 250x700m que se



considera como una superficie suficiente para modelar los efectos que produzca el establecimiento de la obra de toma.

3.5.1. Escalamiento de variables geométricas e hidráulicas

Debido a que el modelo posee una escala del tipo no distorsionada se cumple lo siguiente:

$$l_e = Y_e \quad \text{ecuación 28}$$

Donde l_e es la razón de escala horizontal y Y_e la razón de escala vertical.

Para establecer las relaciones entre los parámetros hidráulicos en el modelo y en el prototipo se debe partir de la condición de similitud de Froude, desarrollada con mayor detalle en el apartado 2.3.4, se tiene que $F_p = F_m$, es decir:

$$\frac{V_p}{\sqrt{g_p L_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m L_m}} \quad \text{ecuación 15}$$

Donde V_m es la velocidad media en el modelo, V_p es la velocidad media en el prototipo, g_m , g_p la gravedad en el modelo y prototipo respectivamente y L_p , L_m la longitud característica que en este caso será igual a y_p y y_m que son el calado de flujo en el prototipo y el modelo respectivamente.

Despejando la velocidad del prototipo y del modelo en un solo término de la igualdad se tiene:

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\frac{g_p L_p}{g_m L_m}} \quad \text{ecuación 29}$$

Como se definió en el apartado 2.3, se tiene que cualquier escala de dimensión ya sea geométrico, cinético, o dinámico es igual a la dimensión del prototipo para la dimensión del modelo; por lo tanto la expresión 29 se puede escribir también:

$$V_e = (g_e)^{\frac{1}{2}} (Y_e)^{1/2} \quad \text{ecuación 30}$$

Tomando en cuenta la condición de que la gravedad tanto en el modelo como en el prototipo es similar o igual se tiene que:

$$V_e = (Y_e)^{1/2} \quad \text{ecuación 31}$$

Por similitud geométrica (apartado 2.3) se tiene que:

$$A_e = l_e Y_e \quad \text{ecuación 32}$$

A_e = escala de área.

Y por similitud cinemática que:

$$Q_e = V_e A_e \quad \text{ecuación 32}$$

Q_e = escala de caudal.

Por lo tanto, reemplazando la ec.28, 31 y 32 en la ec.33 se tiene la escala para la relación de caudales:

$$Q_e = (Y_e)^{\frac{1}{2}} Y_e^2 = Y_e^{5/2} \quad \text{ecuación 32}$$

3.5.2. Construcción del Modelo Físico

La construcción del cauce natural del Río Negro se realizó mediante la colocación de sacos de arena, distribuidos de tal manera de representar apropiadamente la topografía de la zona. Se procedió después con la impermeabilización del cauce utilizando para esto chova y posteriormente a realizar el proceso de calibración del cauce natural del Río; tanto del proceso de transporte de sedimento como de los parámetros de flujo sin la implementación de la obra. En la Figura 3-5 se ilustra el proceso de construcción del modelo del Río.



Figura 3-5. Configuración del Cauce y Lecho Mayor del Río Negro. a) colocación de sacos de arena. b) colocación de chova

Simultáneamente al proceso de configuración del cauce del río se realizó la construcción de la estructura de toma; ésta se realizó en madera, básicamente combinada con materiales que permitan la visualización del flujo, por ejemplo en la toma se ha colocado una plancha de acrílico que permite ver el paso de la corriente, así como también en la sección embaulada a la salida de la toma y su consiguiente sección circular.

Las compuertas son de acero con una cubierta de pintura para evitar la oxidación y las dimensiones son: para la compuerta de lavado un radio de 8,15m en el prototipo o 16,3cm en el modelo, con un ancho de 4m en el prototipo u 8cm en el modelo, y para las compuertas de mantenimiento se tiene un radio de 13m en el

prototipo o 26cm en el modelo y un ancho de 6m en el prototipo o 12cm en el modelo.

A continuación en la Figura 3-6 se presentan algunas imágenes de la obra de toma o captación para el modelo.



Figura 3-6. Obra de Toma

Finalmente implementado la obra de toma o captación, se iniciaron las campañas de experimentación para los diferentes componentes de la obra; entre ellos la estructura de compuerta y su respectivos disipadores de energía.

3.6. Descripción de los parámetros y variables de estudio para la experimentación en la compuerta.

El primer lugar fue necesario identificar los parámetros asociados al fenómeno hidráulico a estudiarse en el modelo físico de la compuerta; partiendo del diseño inicial realizado por la compañía HIDROSANBARTOLO S.A. Tanto en las compuerta de lavado como en las compuertas de mantenimiento, las variables que intervienen en el flujo a través de compuertas son (ver Figura 3-7):

- 1) Abertura (a). los ensayos se realizaron para diferentes aberturas, con el fin de encontrar una operación adecuada al final de las experimentación.
- 2) Calado del flujo aguas arriba de la compuerta (H). el calado o nivel de embalsamiento del río aguas arriba de las compuertas es una variable importante para el control del caudal que pueda pasar por la compuerta, cuya estabilidad depende del caudal y de la abertura de la compuerta; es decir del flujo o caudal que descargue la compuerta.
- 3) Caudal del río (Q). se realizaron experimentos para los caudales de diseño en el prototipo que van desde los formativos de $50\text{m}^3/\text{s}$ a los medios anuales del periodo húmedo de $75\text{ m}^3/\text{s}$ y hasta caudales máximos de

crecida de $1200\text{m}^3/\text{s}$ esperados en el Río para un periodo de retorno de 100 años. los caudales equivalentes para el modelo de Río son $2,83\text{L/s}$; $4,24\text{L/s}$ y $64,92\text{L/s}$ respectivamente.

A continuación se determina la relación existente entre las variables identificadas, es decir, cuáles variables son dependientes y cuáles independientes, quedando de la siguiente manera:

- Variables dependientes:

H: altura aguas arriba de la compuerta; depende del caudal que exista en un tiempo determinado en el río y de la abertura de la compuerta.

- Variables independientes:

Q: caudal, se trabaja con un rango de caudales esperados en el río, sin depender de ningún otro factor o elemento.

a: abertura de la compuerta; se da una abertura según el caudal que se requiera evacuar.

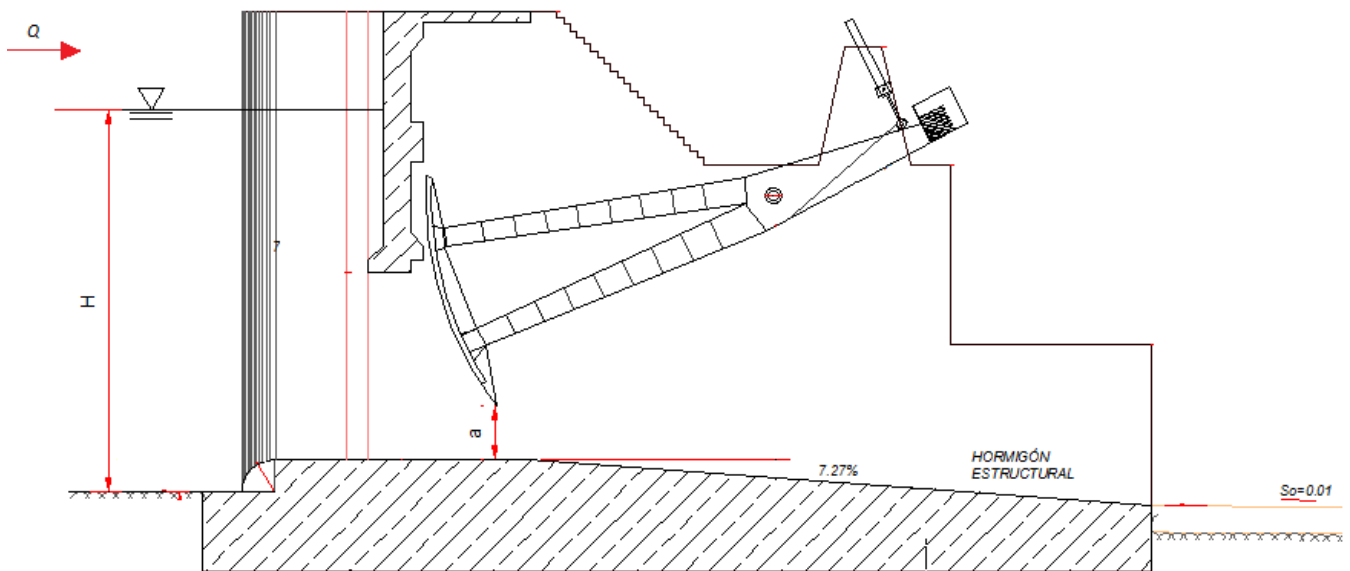


Figura 3-7. Variables que intervienen en la compuerta de lavado y mantenimiento

3.6.1. Calibración de la compuerta.

El punto fundamental en la calibración de la compuerta es la determinación del coeficiente de descarga C_d , para lo cual nos basamos en la Figura 2-5 del apartado 2.4 presentada por Gentilini.



Coeficiente de Descarga

En primer lugar, se partió de los siguientes valores empíricos tabulados que están en función del ángulo de abertura (θ) y de la razón calado aguas arriba - abertura de la compuerta (H/a), obtenidos por (Schroder y Press, 1966) (ver Tabla 3-3).

H/a	15	30	45	60	75	90	θ (°)
	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,3090	1,5708	θ (rad)
13	0,856	0,782	0,720	0,668	0,630	0,594	
12	0,855	0,780	0,718	0,665	0,628	0,592	
8	0,845	0,770	0,710	0,660	0,625	0,590	
7	0,837	0,765	0,702	0,655	0,620	0,585	
6	0,827	0,755	0,695	0,649	0,612	0,582	
5	0,812	0,745	0,684	0,640	0,602	0,567	
4	0,792	0,730	0,673	0,630	0,592	0,568	
3,5	0,780	0,718	0,662	0,620	0,585	0,563	
3	0,762	0,700	0,649	0,610	0,575	0,557	
2,5	0,734	0,677	0,630	0,593	0,568	0,548	

Tabla 3-3. valores de coeficiente de descarga Cd. (Schrodes y Press, 1966)

Con estos valores se obtuvo una gráfica H/a vs. Θ aproximada a la de Gentilini con sus respectivos ajustes (ver Figura 3-8).

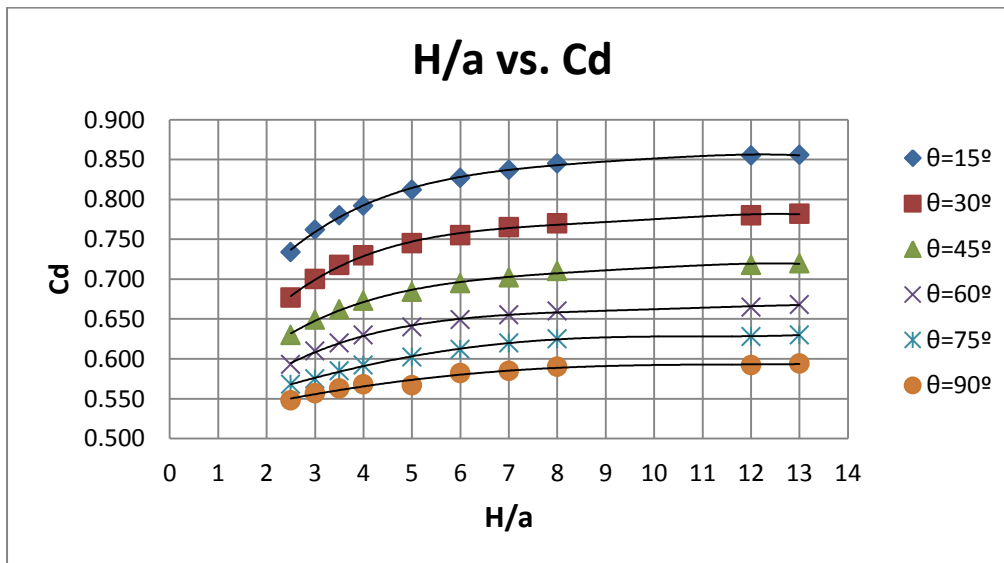


Figura 3-8. . Curva aproximada de Gentilini según los valores de Schrodes y Press - Ajuste del coeficiente de descarga



- Ajustes de las curvas de la Figura 3-8:

$$\begin{aligned} \theta=15^\circ ; \quad C_d &= -3E-05(H/a)^4 + 0,0011(H/a)^3 - \\ & 0,0165(H/a)^2 + 0,1122(H/a) + 0,5431 \\ R^2 &= 0,9977 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta=30^\circ ; \quad C_d &= -3E-05(H/a)^4 + 0,0012(H/a)^3 - \\ & 0,0173(H/a)^2 + 0,1107(H/a) + 0,4921 \\ R^2 &= 0,9975 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta=45^\circ ; \quad C_d &= -2E-05(H/a)^4 + 0,0008(H/a)^3 - \\ & 0,012(H/a)^2 + 0,0804(H/a) + 0,4938 \\ R^2 &= 0,9965 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta=60^\circ ; \quad C_d &= -1E-05(H/a)^4 + 0,0006(H/a)^3 - \\ & 0,0094(H/a)^2 + 0,0663(H/a) + 0,4789 \\ R^2 &= 0,9969 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta=75^\circ ; \quad C_d &= -1E-05(H/a)^4 + 0,0006(H/a)^3 - \\ & 0,0094(H/a)^2 + 0,0663(H/a) + 0,4789 \\ R^2 &= 0,9969 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta=90^\circ ; \quad C_d &= 3E-06(H/a)^4 - 6E-05(H/a)^3 - \\ & 0,0004(H/a)^2 + 0,0141(H/a) + 0,5181 \\ R^2 &= 0,9706 \end{aligned}$$

El siguiente paso fue obtener los ángulos θ , propios para cada abertura de la compuerta de mantenimiento en estudio; para lo cual se utilizó la siguiente expresión geométrica que está en función de la altura del eje del Muñón (h), el radio (r) y la abertura de la compuerta (a). (refiérase Figura 2-3):

$$\theta = \cos^{-1} \frac{(h-a)}{r} \quad \text{ecuación 33}$$

h = altura del muñón.

r = radio de la compuerta.

a = abertura de la compuerta.



θ = ángulo entre la compuerta y la horizontal

Los resultados obtenidos son:

h		A		r		θ	
Modelo (cm)	Prototipo (m)	Modelo (cm)	Prototipo (m)	Modelo (cm)	Prototipo (m)	Modelo radianes	Prototipo grados
19,8	9,9	2	1	26	13	0,817	46,795
19,8	9,9	4	2	26	13	0,918	52,777
19,8	9,9	6	3	26	13	1,011	57,943
19,8	9,9	8	4	26	13	1,100	63,009
19,8	9,9	10	5	26	13	1,184	67,857
19,8	9,9	12	6	26	13	1,266	72,742
19,8	9,9	14	7	26	13	1,345	77,110

Tabla 3-4. Ángulos de abertura entre la compuerta y la horizontal

Volviendo a la Tabla de datos de Schrodes y Press (ver Tabla 3-3) se realizó una interpolación de los valores de θ , propios de la compuerta en estudio (ver Tabla 3-4), obteniendo los siguientes valores del coeficiente de descarga propios de la compuerta en estudio.

	15	30	45	47	53	58	60	63	68	73	75	77	90	B (°)	B (ra)
a	0,2618	0,5236	0,7854	0,8203	0,9250	1,0123	1,0472	1,0996	1,1868	1,2741	1,3090	1,3439	1,5708		
3	0,856	0,782	0,720	0,713	0,692	0,675	0,668	0,660	0,648	0,635	0,630	0,625	0,594		
2	0,855	0,780	0,718	0,711	0,690	0,672	0,665	0,658	0,645	0,633	0,628	0,623	0,592		
8	0,845	0,770	0,710	0,703	0,683	0,667	0,660	0,653	0,641	0,630	0,625	0,620	0,590		
7	0,837	0,765	0,702	0,696	0,677	0,661	0,655	0,648	0,636	0,625	0,620	0,615	0,585		
6	0,827	0,755	0,695	0,689	0,670	0,655	0,649	0,642	0,629	0,617	0,612	0,608	0,582		
5	0,812	0,745	0,684	0,678	0,661	0,646	0,640	0,632	0,620	0,607	0,602	0,597	0,567		
4	0,792	0,730	0,673	0,667	0,650	0,636	0,630	0,622	0,610	0,597	0,592	0,589	0,568		
5	0,780	0,718	0,662	0,656	0,640	0,626	0,620	0,613	0,601	0,590	0,585	0,582	0,563		
3	0,762	0,700	0,649	0,644	0,628	0,615	0,610	0,603	0,591	0,580	0,575	0,573	0,557		
5	0,734	0,677	0,630	0,625	0,610	0,598	0,593	0,588	0,580	0,571	0,568	0,565	0,548		

Tabla 3-5. interpolación del coeficiente de descarga para los ángulos de estudio de la tabla 3-4.

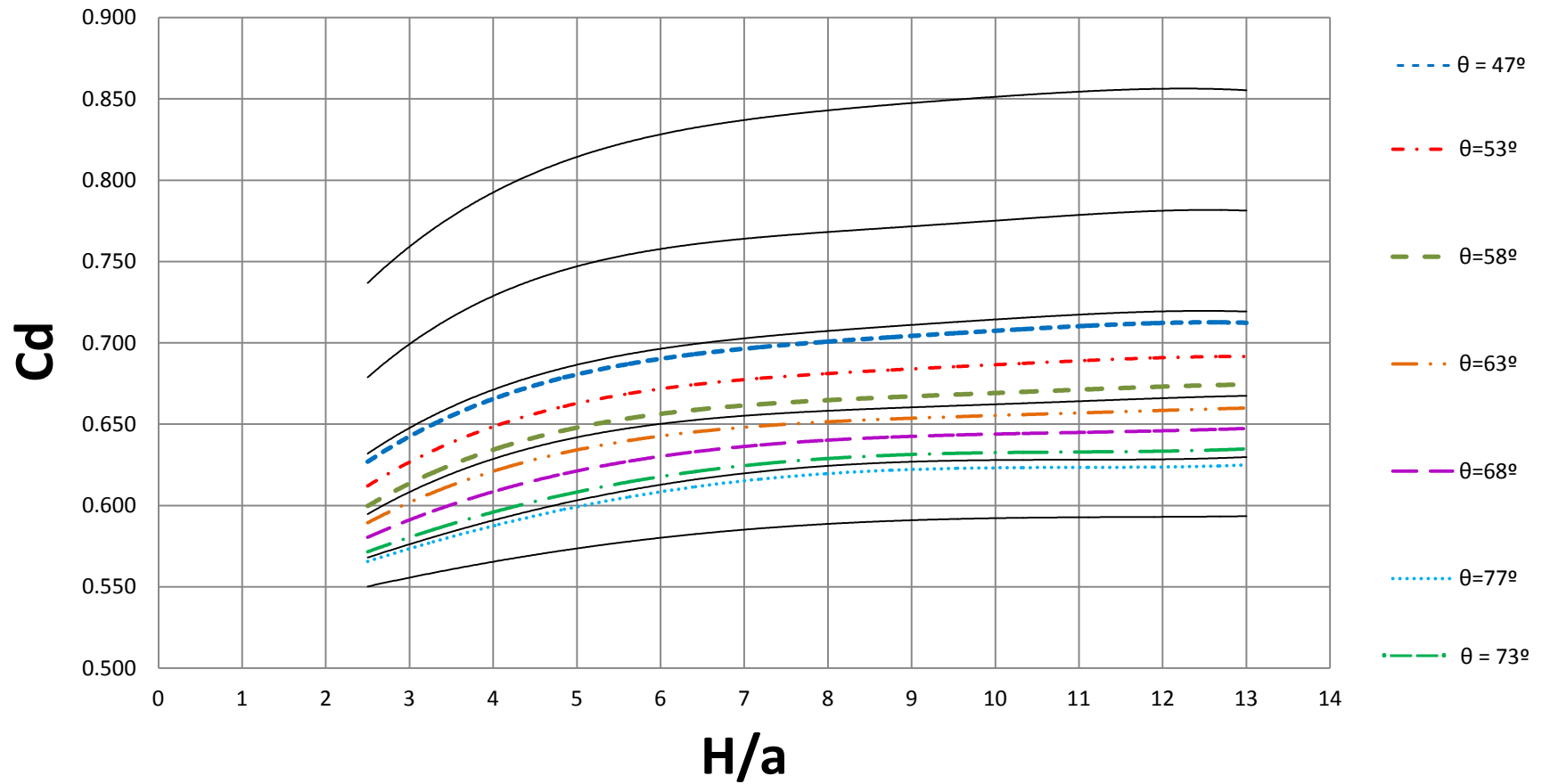


UNIVERSIDAD DE CUENCA

Finalmente graficando los datos de la tabla 3-5 se obtienen las curvas del coeficiente de descarga, propios para la compuerta en estudio.



Curva del Coeficiente de Descarga





UNIVERSIDAD DE CUENCA

Figura 3-9. Ajuste de la Curva de descarga para los ángulos de la tabla 3-3. Las curvas en línea continua corresponden al ajuste teórico de los datos de Schrodes y Press



- Ajustes obtenidos para la compuerta en estudio (tabla 3-3):

$$\theta=47^{\circ}; \quad C_d = -2E-05(H/a)^4 + 0,0008(H/a)^3 - 0,0117(H/a)^2 + 0,0785(H/a) + 0,4918$$
$$R^2 = 0,9966$$

$$\theta=53^{\circ}; \quad C_d = -2E-05(H/a)^4 + 0,0007(H/a)^3 - 0,0106(H/a)^2 + 0,0728(H/a) + 0,4859$$
$$R^2 = 0,9968$$

$$\theta=58^{\circ}; \quad C_d = -2E-05(H/a)^4 + 0,0006(H/a)^3 - 0,0098(H/a)^2 + 0,0681(H/a) + 0,4809$$
$$R^2 = 0,9969$$

$$\theta=63^{\circ}; \quad C_d = -1E-05(H/a)^4 + 0,0005(H/a)^3 - 0,0075(H/a)^2 + 0,0569(H/a) + 0,4874$$
$$R^2 = 0,9976$$

$$\theta=68^{\circ}; \quad C_d = -3E-06(H/a)^4 + 0,0002(H/a)^3 - 0,0044(H/a)^2 + 0,0414(H/a) + 0,5016$$
$$R^2 = 0,9984$$

$$\theta=73^{\circ}; \quad C_d = 4E-06(H/a)^4 - 6E-05(H/a)^3 - 0,0013(H/a)^2 + 0,0258(H/a) + 0,5158$$
$$R^2 = 0,9987$$

$$\theta=77^{\circ}; \quad C_d = 7E-06(H/a)^4 - 0,0001(H/a)^3 - 9E-05(H/a)^2 + 0,0189(H/a) + 0,5211$$
$$R^2 = 0,998$$

Curva de Descarga

La curva de descarga describe el caudal que fluirá a través de la compuerta (Q) en función de la altura del calado aguas arriba (H). Par el efecto fue necesario la utilización de las ecuaciones de ajuste de las curvas de los coeficientes de descarga obtenidas anteriormente.

El procedimiento consistió en calcular diferentes valores del coeficientes de descarga (Cd) para distintos valores del calado aguas arriba (H) mediante las ecuaciones de ajuste correspondientes a los ángulos de estudio (ver Tabla 3-4); y

a su vez, utilizando la ecuación 16 ($Q = Cd \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2gH}$) que describe la descarga del flujo a través de compuertas, se calculan los valores del caudal (Q) para los distintos valores de (Cd). Este procedimiento se realizó para diferentes aberturas de la compuerta (ver Tabla 3-4) dando como resultado la siguiente gráfica: (ver Figura 3-10)

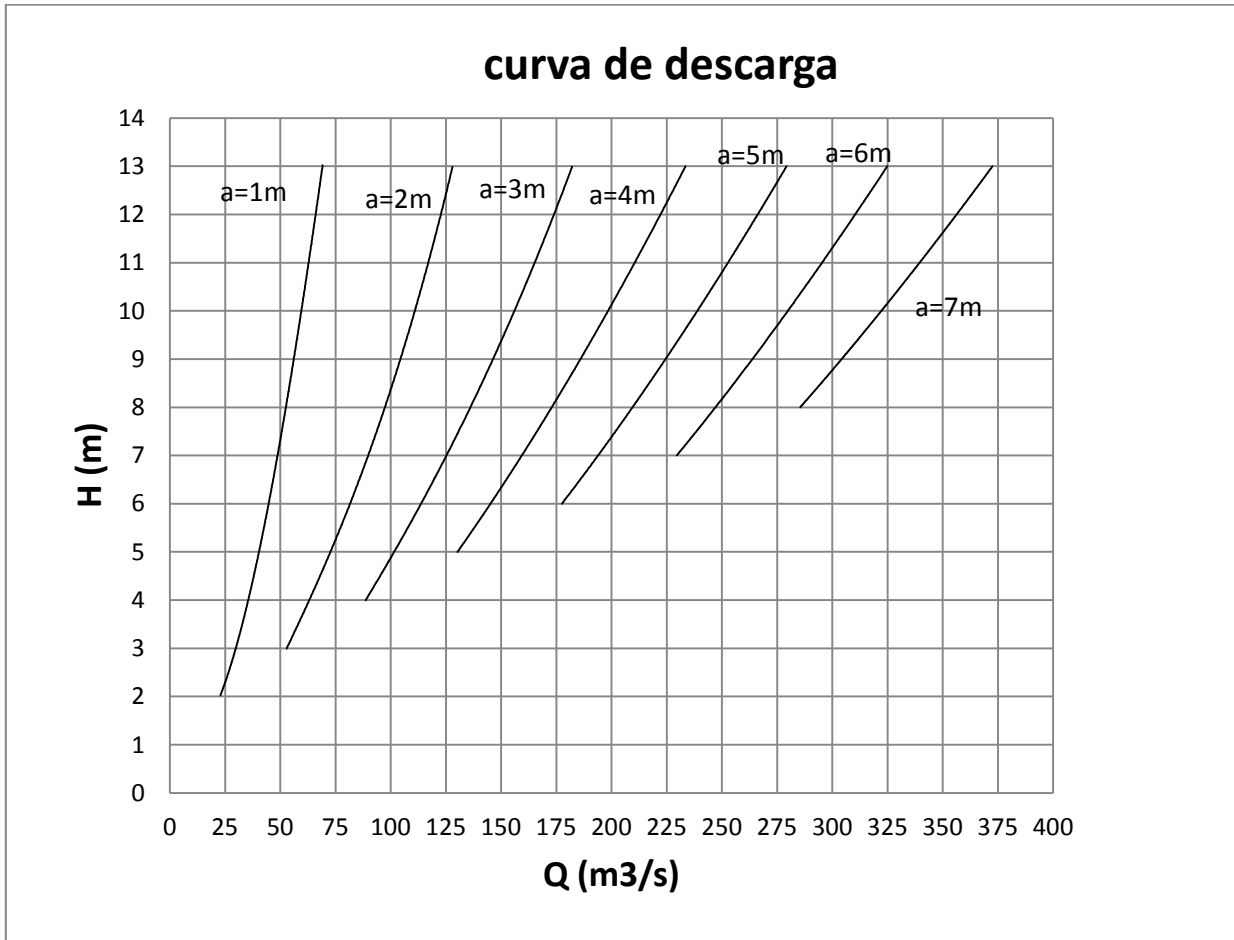


Figura 3-10. Curva de Descarga para diferentes aberturas de la compuerta. Prototipo

Los cálculos se muestran en las tablas del anexo A.1.1 Datos para la Construcción de la Curva de descarga.

3.6.2. Validación de la curva de Descarga.

La curva de descarga presentada es necesaria validarla, para lo cual fue necesario la utilización del canal del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Cuenca y de instrumentos propios para la medición de caudales.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

El procedimiento para la Validación de la compuerta consistió en mantener una calado aguas arriba de la compuerta (H) constante, para una cierta abertura (a), con lo que se garantiza que el flujo de agua sea constante, es decir, que el caudal que circula en el canal sea el mismo que se descargue a través de la compuerta. A su vez, el caudal que circula por el canal se obtuvo mediante el aforamiento en una sección anterior al tramo donde se implementó el modelo, aplicando la ecuación de continuidad del flujo ($Q=v \cdot A$). Las velocidades (v) se obtuvieron mediante la utilización de instrumentos propios para su medición, en este caso se utilizó el Molinete Aqua Cont para medir velocidades.

El comportamiento de las velocidades en una sección vertical es teóricamente conocido; donde las velocidades medias se presentan a 0,6 de profundidad. En nuestro caso hemos asumido dicha profundidad para la toma de datos ya se trata de un canal de laboratorio con poca profundidad y sección rectangular regular sin variaciones considerables.

La sección mojada (A) utilizada para el aforo es igual a $A= bc \times hc$, con (hc) igual al calado de aforo medido desde el piso del canal y (bc) el ancho de aforo o del canal igual a 30cm.

El modelo de compuerta que se utilizó para los ensayos en el canal del laboratorio de hidráulica de la Universidad de Cuenca fue el mismo que se utilizó en el modelo de la estructura de captación, sin modificaciones de escala. Para el efecto, se tuvo la necesidad de disminuir el ancho del canal de 30cm a 12 cm, propios del modelo de compuerta de estudio. La disminución se la realizó colocando una pantalla de madera a 18 cm de una de las paredes del canal para de esta manera obtener el ancho de 12cm deseados (ver figura 3-11).

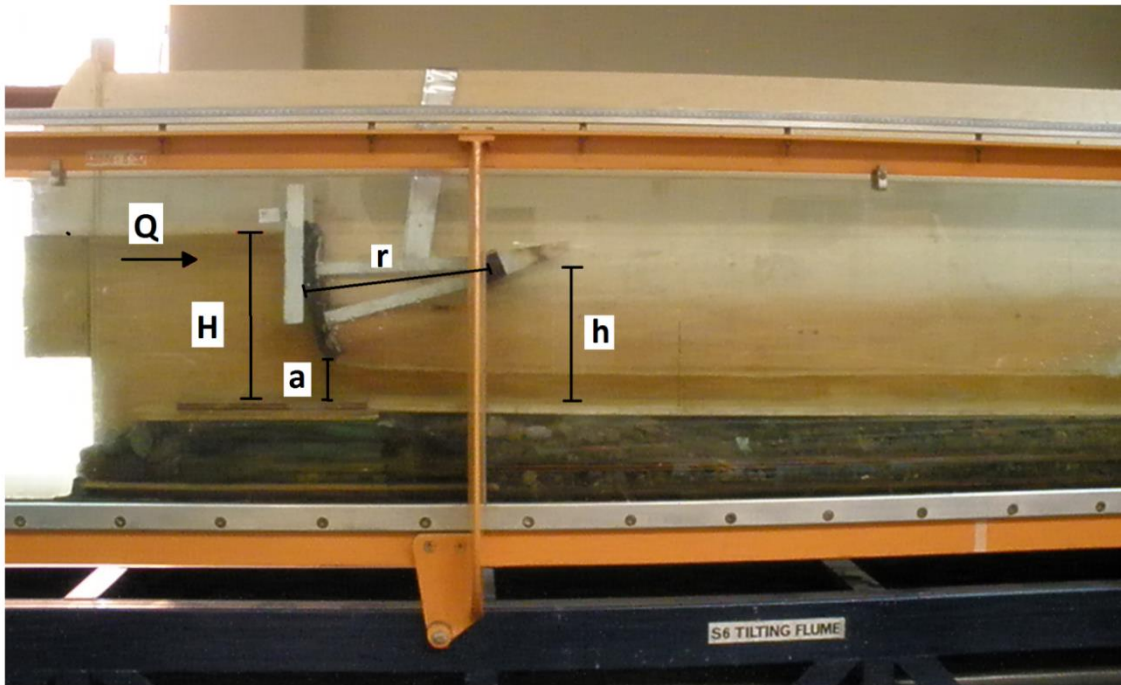


Figura 3-11. implementación del modelo de compuerta en el canal de Hidráulica. Q=caudal, H=calado aguas arriba, a=abertura, r=radio, h= altura del Muñón

La siguiente tabla nos muestra el resumen de los resultados obtenidos del aforamiento (ver Tabla 3-6):

Resultados del aforamiento							
a =1m		a=3m		a=5m		a=7m	
Q (m3/s)	H (m)	Q (m3/s)	H (m)	Q (m3/s)	H (m)	Q (m3/s)	H (m)
53,11	7,25	176,94	12,8	270,01	12,25	369,37	12,8
67,01	11,35	105,77	6	269,19	12	308,39	9,5
38,89	4,95	155,61	9,5	218,62	8,5	326,11	10,5
56,32	7,35	103,74	5,5	210,31	7,5	370,36	12,75
58,11	7,5	153,56	10	231,56	10	348,01	11,5
52,81	6,35	126,75	7,5	253,54	10,75	368,59	12,25
71,52	13			245,32	11,5	342,18	11,35
36,43	3,3						

Tabla 3-6. Resultados del aforamiento. Prototipo

En las tablas del Anexo A.1.2 se presentan los de datos y cálculos del ensayo de aforo.

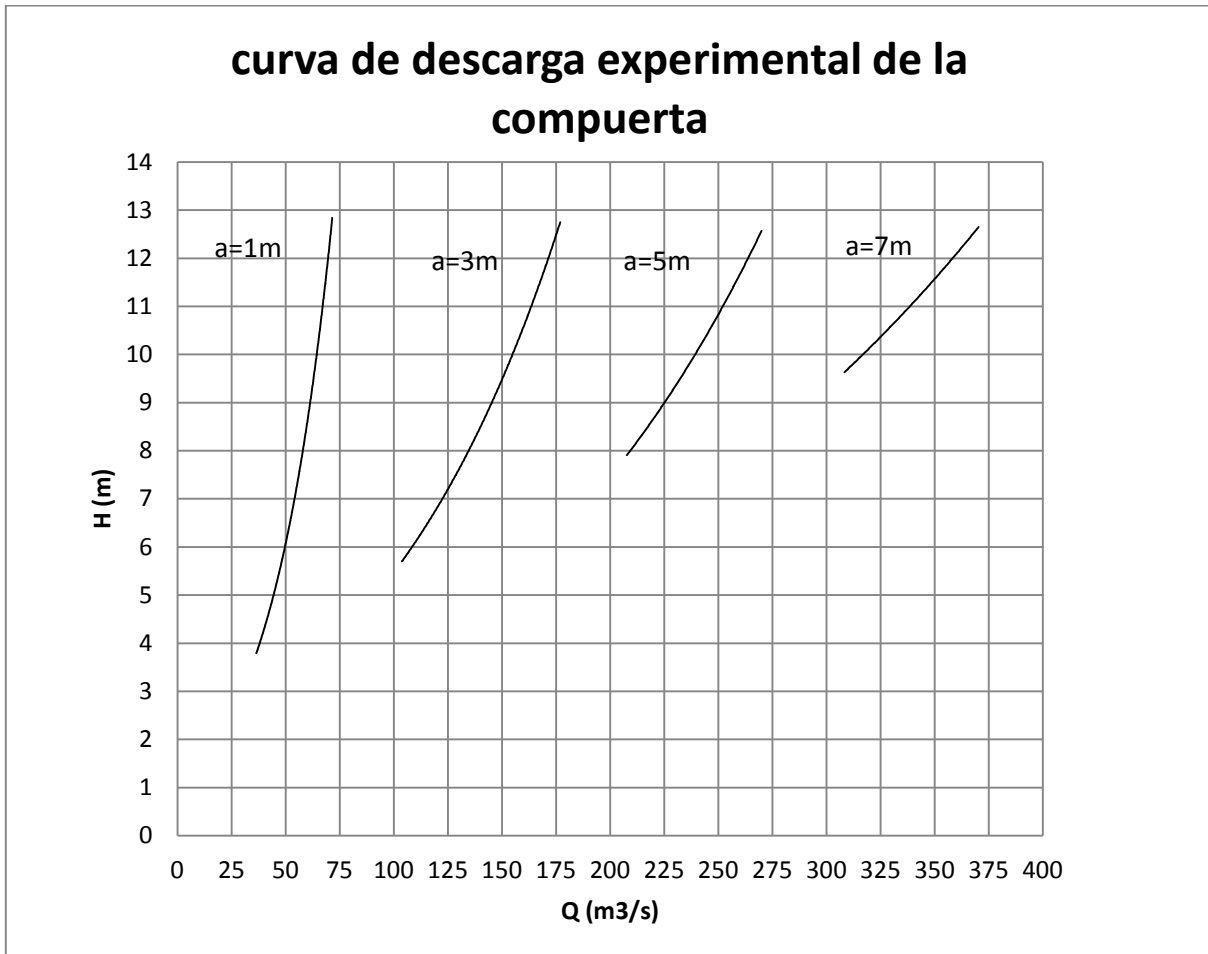


Figura 3-12. Grafica de validación de la curva de descarga. Prototipo

Como se puede observar, la figura 3-12 presenta una gran similitud a las gráficas de descarga teóricas de Gentilini, con un error muy bajo con respecto a los datos de la figura 3-10 donde no sobrepasa los 4m³/s de diferencia. Por lo tanto la Curva de descarga teóricas de Gentilini queda validada con porcentajes de errores muy bajos con respecto a la gráfica experimental obtenida del aforo.

3.7. Descripción de la estructura de disipación de energía propuesta en el diseño original.

Según el diseño original, en la zona de descarga se han dispuesto como disipador de energía a canales horizontales rectangulares individuales para cada una de las tres compuertas de mantenimiento. Dichos canales son en su totalidad de hormigón armado y con muros laterales de altura máxima de 12cm de alto en el

modelo o 6m en el prototipo. El diseño también contempla un enrocado en la salida del canal de 20cm en el modelo o 10m de largo en el prototipo como medida extra para impedir la erosión o socavación a la salida del dissipador. El dissipador de energía definido en el diseño original es un cuenco del tipo I de la USBR que se describe en el apartado 2.6.1. con una pendiente de 7.3 % en el piso del cuenco.

De acuerdo a los criterios de diseño, la disipación de energía debe producirse dentro de la longitud del cuenco y su formación depende del nivel de calado aguas abajo del Rio que se pueda alcanzar. Este tipo de cuenco está diseñado para números de froude entre $4,5 < F_1 < 9$ y para caudales unitarios mayores $q > 45 \text{m}^2/\text{s}$.

Un esquema del diseño original de disipación con sus dimensiones y cotas se muestra en la figura 3-6.

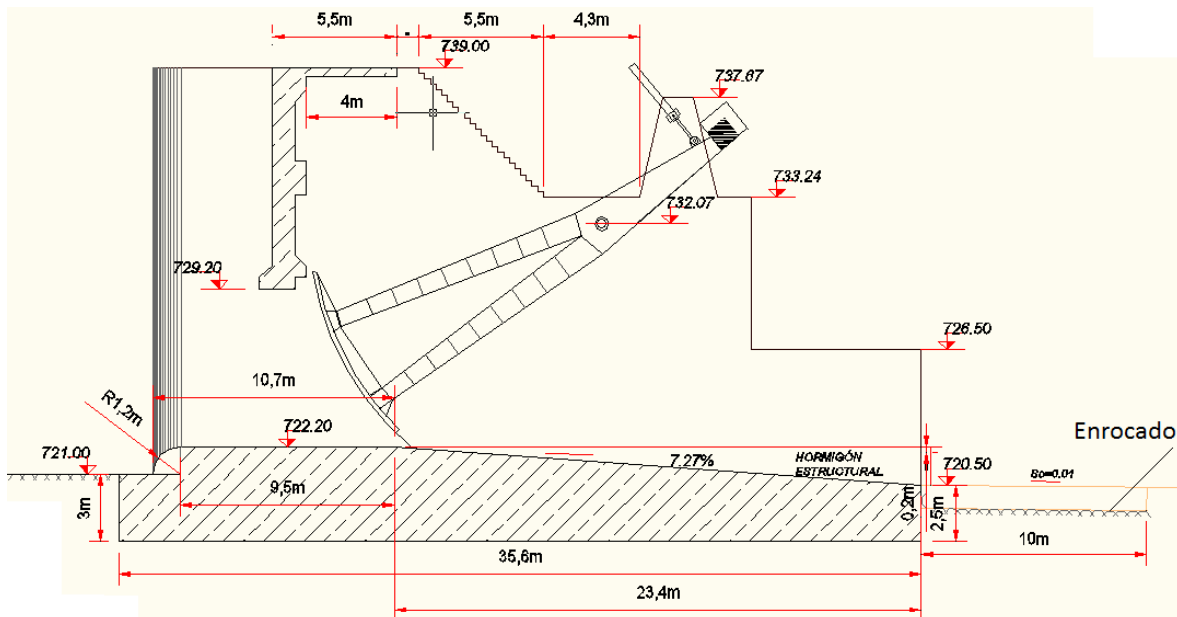


Figura 3-13. Dimensiones y cotas del diseño original para la dissipador de energía en el modelo (HIDROTECH) .

Un mayor detalle del diseño se muestra en los planos generales de la captación del Anexo A.4.

3.7.1. Identificación de los problemas relacionados con la disipación de energía.

Antes de poder realizar cualquier prediseño o dimensionamiento alternativo al original , se debió identificar en primer lugar la problemática que se presenta a la salida del canal de descarga y en el cuenco mismo, de tal manera que justifique los nuevos diseños y estudios de dissipadores. Para esto se realizaron varios

ensayos preliminares en el modelo sobre el diseño original de la estructura, donde se permitió verificar lo siguiente:

- Se pudo observar que el material del enrocado de 2,5 - 3m de diámetro es efectivo para aberturas de compuerta menores a 3m en el prototipo y con máxima carga, es decir, soportará una descarga de aproximadamente $180\text{m}^3/\text{s}$ con velocidad de salida de hasta $11,88\text{m/s}$ y calado de salida de $1,63\text{m}$ sin arrastre de material en el prototipo; pero a partir de lo 3m de abertura empieza a presentarse socavación en el enrocado hasta llegar a una abertura de 4m, con carga máxima aguas arriba de la compuerta correspondiente a un caudal de $230\text{m}^3/\text{s}$, calado de salida de $3,1\text{m}$ y velocidades de $12,36\text{m/s}$ en el prototipo donde se tienen problemas de arrastre de material y socavación muy grandes.

Esto nos dio una idea inicial del límite de velocidad media de arrastre experimental que puede resistir el enrocado con material de hasta 3m.

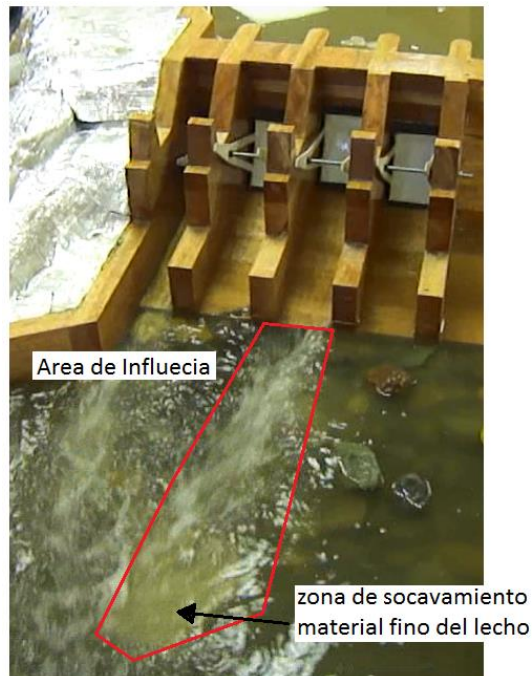


Figura 3-14. influencia del flujo sobre el enrocado. $a=1\text{m}$, $Q=75\text{m}^3/\text{s}$, $v=11,16\text{m/s}$



Figura 3-15. Enrocado después del ensayo. $a=3\text{m}$, $180\text{m}^3/\text{s}$ y $v=11,88\text{m/s}$ de salida en el prototipo

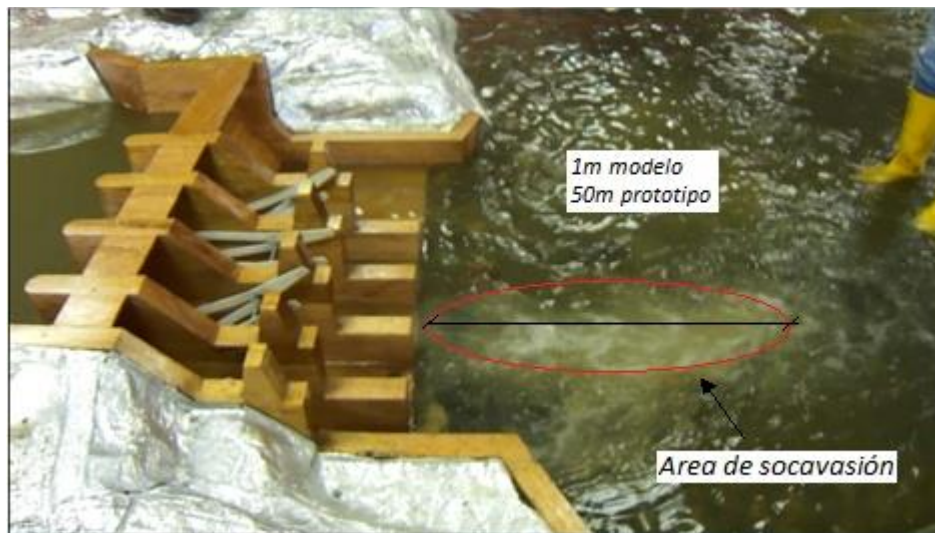


Figura 3-16. socavación del enrocado durante el ensayo y del lecho del Rio. $a=4\text{m}$, $v=12,36\text{m/s}$ en el prototipo

- Un punto muy importante de señalar es el socavamiento del material fino del lecho aguas abajo del enrocado que se observa en las figuras 3-8 y 3-9. Esta erosión se produce debido a las ondas que se forman por las altas velocidades que se trasladan más allá del enrocado. No se pudo tener una medida exacta o un conocimiento seguro de la profundidad de socavación que producen estas ondas ya que el fondo del

modelo del rio tiene una profundidad limite de 5cm (2,5m en el prototipo). Pero si se puede observar una longitud de 34cm (17 en el prototipo) de socavación (ver figura 3-9).

El estudio propio de la teoría de socavación en descarga de canales esta fuera del alcance de esta tesis, por lo que solo se tomaron parámetros experimentales y referenciales para determinar el inicio de la socavación en el lecho Rio.

- Los ensayos con carga máxima dejó en evidencia la magnitud del socavamiento y arrastre que sufriría el lecho del rio al final de los canales disipadores de energía de las compuertas. La descarga de caudal fue de $370\text{m}^3/\text{s}$ con carga máxima y un calado de 4,2m a la salida del disipador en el prototipo.

A continuación en la figura 3-10 se muestra la magnitud del daño causado en el caso de la máxima descarga de las compuertas evidenciando la su poca o ninguna eficiencia y efectividad del disipador de diseño original para caudales máximos.

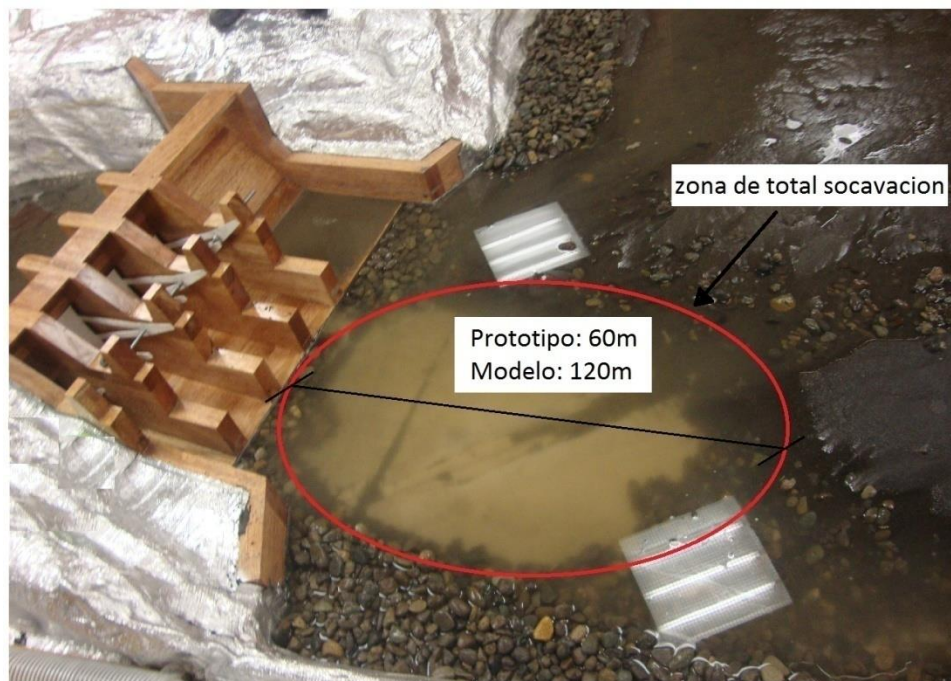


Figura 3-17. socavación después del ensayo. $a=7\text{m}$, $Q=370\text{m}^3/\text{s}$, $v=14,5\text{m/s}$ en el prototipo. Abierto las tres compuertas de mantenimiento.

- Se pudo comprobar también problemas a la salida del dissipador en donde se produce contracciones del flujo en dirección al centro del mismo es decir y hacia el fondo del río aumentando el proceso de socavación.

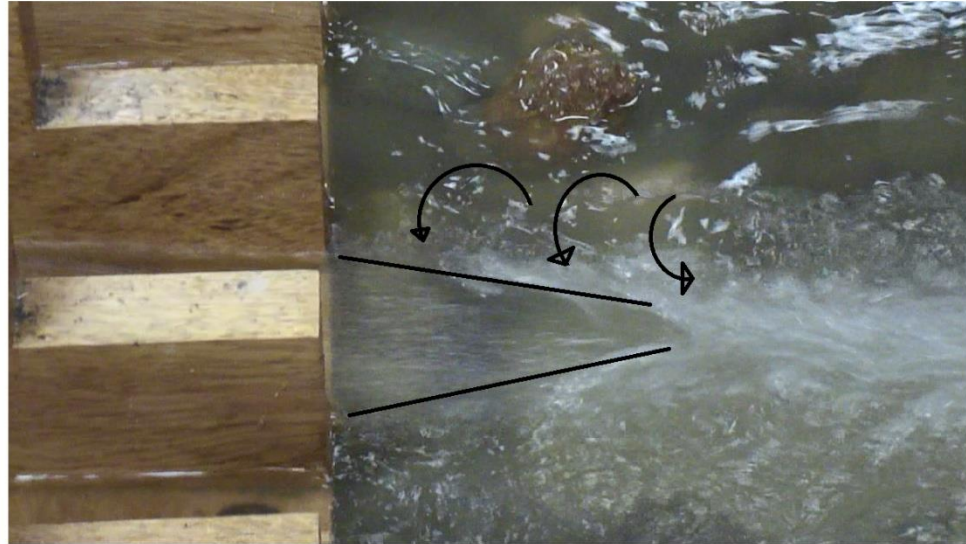


Figura 3-18. Contracción del flujo a la salida del canal de disipación.

- El problema principal que se presentó en este dissipador es la formación del resalto hidráulico, fundamental para la disipación de energía. Esto se debe a que no se tienen las condiciones adecuadas del calado aguas abajo del Río (Y_2') para su formación ya que en canales horizontales el resalto hidráulico se presentará únicamente cuando el calado aguas abajo Y_2' del Río sea igual a la profundidad Y_2 secuente (ver Figura 3-19). La razón de no contar con un calado Y_2' que nos permita igualar al calado secuente Y_2 se debe a la morfología propia del Río que sufre un ensanchamiento brusco del cauce justo al final de la captación. Este ensanchamiento del cauce tiene como consecuencia que $Y_2' < Y_2$ lo que significa que el resalto hidráulico se va a desplazar hacia aguas abajo hasta un punto donde otra vez se cumpla $y_2' = y_2$.

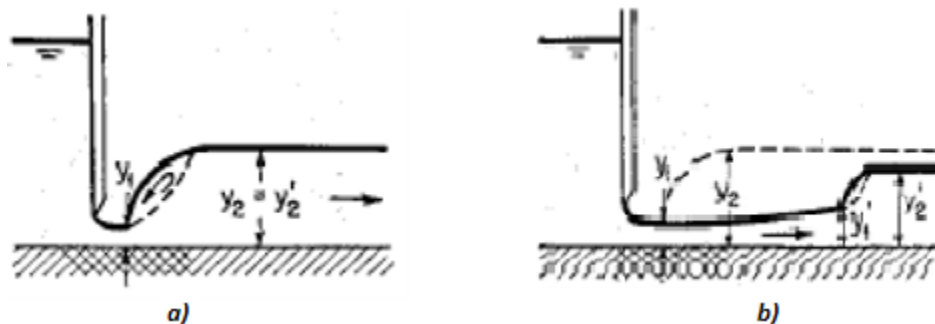


Figura 3-19. a) resalto hidráulico cuando calado aguas abajo del Río y_2' es igual al calado secuente y_2 ;

b) resalto hidráulico cuando el calado aguas abajo del Rio y2' es igual al calado secuente y2.

- Un último aspecto que se consideró, aunque solo de manera observacional, es el lavado de sedimentos a través de las compuertas y el problema de azolvamiento en los disipadores. Como se puede observar en la Figura 3-20, de los ensayos realizados en compuertas con tasas de arrastre normales de sedimento (ver *estudio para validación de un modelo de lavado de sedimentos en embalses y otras estructuras hidráulicas, PROMAS 2012*); la compuerta de lavado produce una gran azolvamiento de material sobre el cuenco disipador para aberturas máximas de 5m y caudales grandes de hasta $130\text{m}^3/\text{s}$.



Figura 3-20. azolvamiento en la compuerta de lavado.

Al finalizar los ensayos preliminares de identificación de problemas en el diseño original, se presentó como primer parámetro de control para el correcto desempeño de los cuencos, una velocidad media máxima en la salida del disipador de 10m/s en caudales máximos y que nos sirvió también para obtener un criterio de selección en las alternativas planteadas.

3.7.2. Descripción de las variables de estudio que intervienen en el experimentación de disipadores, medición y toma de datos

Los parámetros y variables que intervienen en la disipación de energía son básicamente los que aparecen en el fenómeno del resalto hidráulico, definidos en

el apartado 2.5.2. A continuación se mencionan las variables que intervinieron en el desarrollo de estos ensayos y el procedimiento para su medición, que incluirán también las variables del flujo a través de compuertas:

- Caudal (Q): primera variable que se requirió calibrar y validarla previo a la experimentación. Los caudales se obtendrán por medio de la curva de descarga validada en el apartado 3.2.3.
- Abertura de la compuerta (a): se debe controlar la abertura de la compuerta según el caudal que se desee descargar, siendo como máximo 14cm de abertura en el modelo y 7m en el prototipo. Esta variables es muy importante dentro del estudio ya que a mas de controlar el flujo en la compuerta, también depende de esta la altura contraída Y_1 que se forma en el cuenco.
- Variables del resalto hidráulico: La medición se realizó por observación del fenómeno del resalto hidráulico que ocurre en el cuenco disipador, medimos las alturas conjugadas (Y_1, Y_2) y la longitud del resalto hidráulico (L_r); para lo cual utiliza los limnímetros descritos en el Anexo A.1. Estos permiten medir la altura del agua y la abscisa exacta en la rengleta del canal donde se realizó la medición, la diferencia entre las abscisas Y_1 y Y_2 permiten obtener la longitud del resalto L_r . La altura contraída Y_1 se obtuvo también de manera teórica mediante la aplicación de la ecuación de conservación de la energía ($E_0=E_1+hf$) despreciando las perdidas $hf=0$. Dicha conservación se realizó entre el embalse y la sección de la altura contraída.

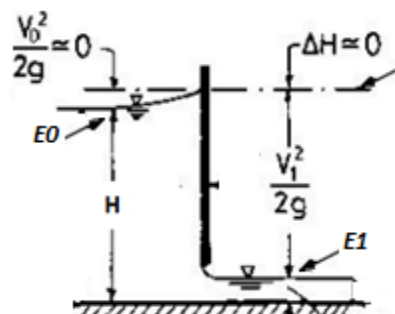


Figura 3-21. conservación de la energía

$$E_0 = z_0 + H + \frac{V_0^2}{2g}$$

$$E_1 = Y_1 + \frac{V_1^2}{2g}$$

Donde z_0 = Desnivel al plano de referencia (profundización del cuenco).

Una vez medidas y calculadas las alturas conjugadas, se obtuvo fácilmente las velocidades medias en dichas secciones, aplicando la ecuación de continuidad $V=Q/A$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Calado a la salida del dissipador (Y_3) y velocidad al final del cuenco dissipador o velocidad media de salida (V_f): el calado a la salida del dissipador se mide con regla en escala milimétrica y en base a esta se obtienen los valores de velocidad media de salida o velocidad media al final del cuenco para cierto caudal.
- Calado del Rio aguas abajo del dissipador (Y_2'): esta variable es controlada aguas abajo del dissipador con el fin de identificar las condiciones optimas que se podrían aplicar a la salida del dissipador y de esta manera poder controlar los parámetros que producen socavación en el lecho del rio como las altas velocidades de salida.

De la misma manera que en los ensayos de las compuertas, se determinó la relación existente entre las variables identificadas:

- Variables independientes:
 - Caudal (Q)
 - Altura de la compuerta (a)
 - Calado aguas del Rio aguas abajo del Dissipador (Y_2')
- Variables dependientes:
 - Variables del resalto hidráulico : altura contraída (Y_1), altura secuente (Y_2) y longitud del resalto (L_r)
 - Calado a la salida del dissipador (Y_3) y velocidad media de salida (V_f):



CAPITULO 4

4. ESTUDIO EN MODELO FISICO PARA OPTIMIZACION DEL DISEÑO

4.1. Alternativas propuestas para el diseño de disipadores

Los resultados de los ensayos preliminares se presentaron a la compañía responsable del proyecto HIDROSANBARTOLO S.A; que en consecuencia tomó la decisión de eliminar la compuerta de lavado de la estructura, por lo que no fue motivo de estudio en el desarrollo de esta tesis, además de esto ,se presentaron nuevos diseños para la disipación de energía para el caso de las compuertas de mantenimiento, algunos sugerido por la misma compañía HIDROSANBARTOLO S.A.

A continuación se describen todas la alternativas propuestas:

4.1.1. Alternativa 1: cuenco disipador tipo I de la USBR con pendiente de 1,5%

Esta alternativa de disipador fue presentada por el diseñador del proyecto y la compañía HIDROSANBARTOLO S.A. el cual se trata de una variante del diseño original.

Al igual que el diseño original, esta variante pertenece al tipo I de USBR de cuenco disipador horizontal con una leve pendiente de $s=1,5\%$. La longitud del cuenco es la misma del diseño original. A continuación se muestra un esquema general del diseño (ver Figura 4-1)

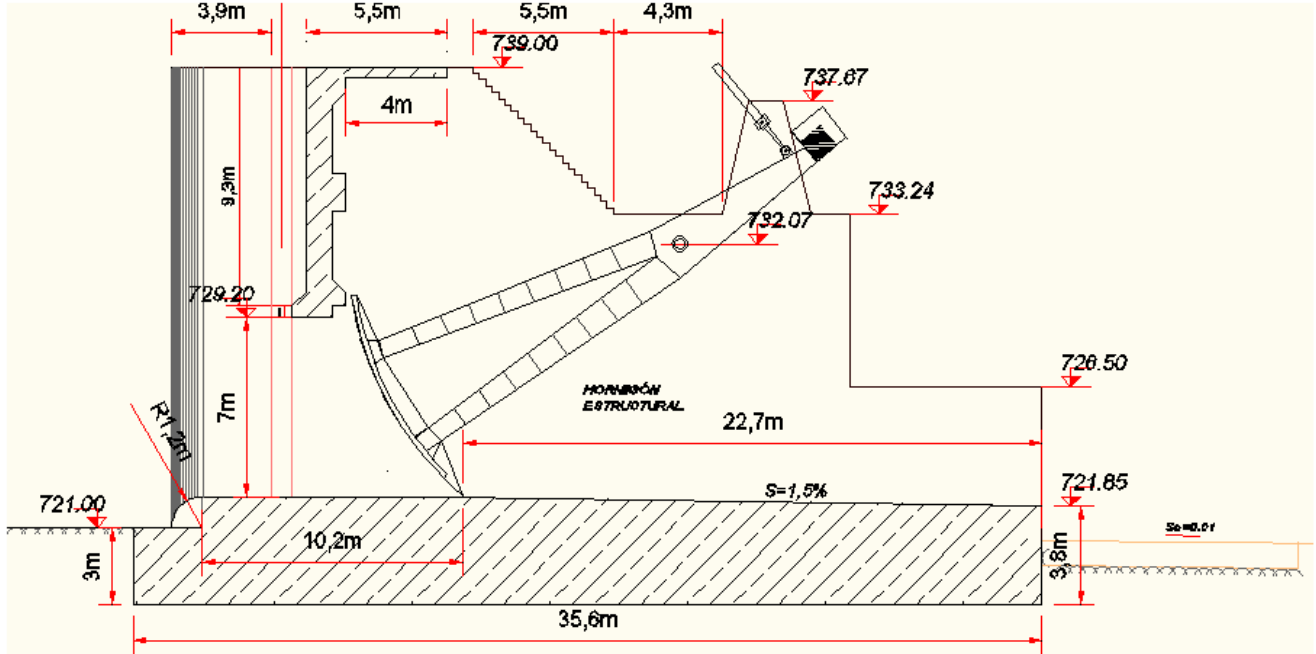


Figura 4-1. Alternativa 1: Cuenco tipo 1 de la USBR Prototipo

La implementación del modelo en el laboratorio de hidráulica a escala 1:50 se muestra en la Figura 4-2:



Figura 4-2. modelo de la Alternativa 1: USBR tipo I



4.1.2. Alternativa 2: Cuenco disipador tipo cuña.

Este diseño fue sugerido también por la por la compañía HIDROSANBARTOLO S.A. y no pertenece a ningún procedimiento de diseño establecido, aunque podría decirse que se trata de otra variante del cuenco tipo I de la USBR con la implementación de una cuenca en forma de cuña a la entrada del cuenco justo después de la compuerta . La profundidad de la cuña (z) se estableció en 2,5m.

La Longitud del cuenco queda determinado después de los ensayos en función de la longitud del resalto obtenido.

El umbral o bordillo de salida tiene una pendiente suave de 2,5:1 con el fin de evitar azolvamiento en la cuenca en forma de cuña.

Para la entrada al cuenco disipador se ha tomado en consideración un diseño con perfil Creager con el fin de controlar de mejor manera la caída del flujo y la formación del resalto. Su diseño sigue los siguientes criterios:

- Perfil tipo Creager de la superficie de entrada al cuenco:
Con base a los experimentos realizados por la Bureau of Reclamation (USBR) desde 1932 hasta 1938 para vertederos, se desarrollaron coordenadas para la superficie de entrada cuya expresión general es:

$$\frac{Y}{H_o} = -K \left(\frac{X}{H_o} \right)^n \quad \text{ecuación 34}$$

Donde X y Y son las coordenadas del perfil, Ho es la altura del flujos sobre el perfil, es decir igual a la abertura de la compuerta Ho=a. K y n son parámetros que dependen de la pendiente donde según Creager se tienen valores para K=0,5 y n=1,85.

	Modelo (cm)	Prototipo (m)
Ho	14	7
K	0,5	0,5
N	1,85	1,85

A continuación se muestra la Figura 4-3 del perfil creager calculada hasta una profundidad de Y = 2,5m en el prototipo según el diseño.

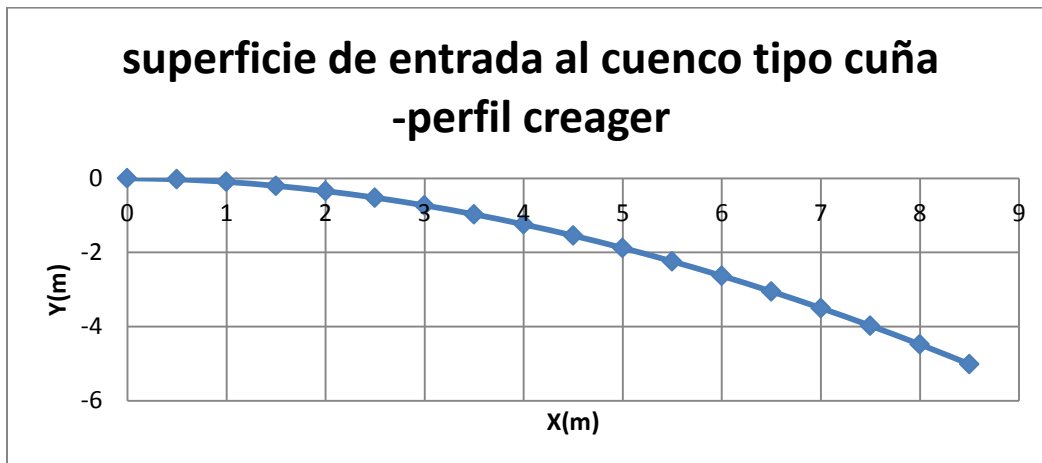


Figura 4-3. Perfil Creager de la superficie de entrada al cuenco para alternativa 2- prototipo

Los datos obtenidos para la construcción de este perfil se muestra en el anexo A.2.2.1

Finalmente, un esquema del cuenco disipador tipo cuña y sus dimensiones se presenta en la Figura 4-4 y Figura 4-5 del prototipo y modelo respectivamente.

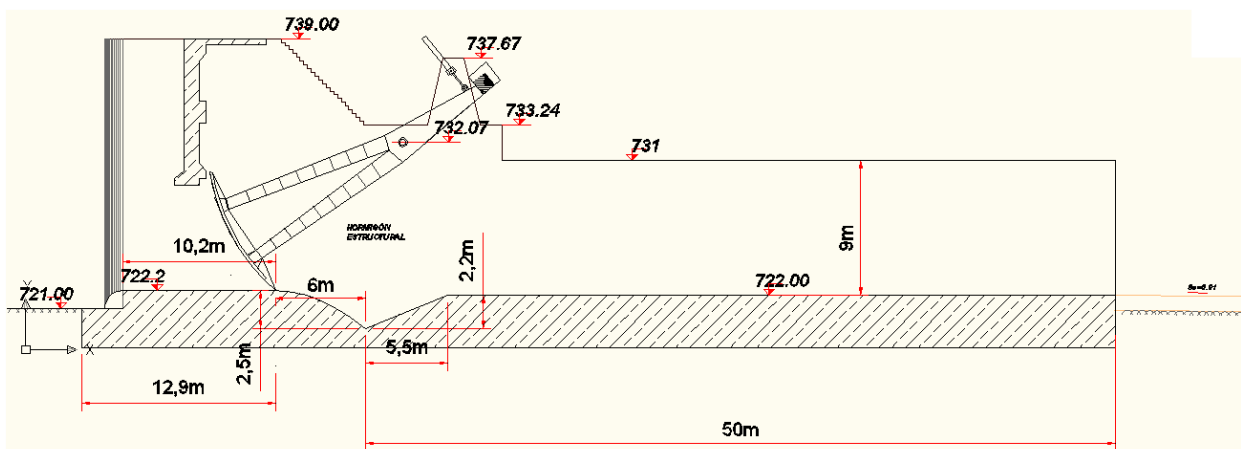


Figura 4-4. Alternativa 2. tipo cuña - Prototipo



Figura 4-5. Alternativa 2 tipo cuña - Modelo

4.1.3. Alternativa 3: cuenco disipador tipo IV de la USBR

Esta alternativa de diseño para disipadores de energía fue escogida debido a que es la mejor que se adapta teóricamente a estructuras de descarga en canales y se lo diseñó para la máxima descarga posible de la compuerta, es decir, para un caudal de $370\text{m}^3/\text{s}$ con carga $H=12,8\text{m}$ en el prototipo.

El cuenco está formado por un umbral de entrada diseñada con perfil Creager de profundidad 5m en el prototipo o 10cm en el modelo, .

El procedimiento para el diseño del perfil Creager, es el mismo realizado en la alternativa 2 de disipador(ver apartado 3.4.2.), cuyos cálculos se muestran en el Anexo A2.2.2. La Figura 4-6 muestra el esquema el perfil Creager diseñado:

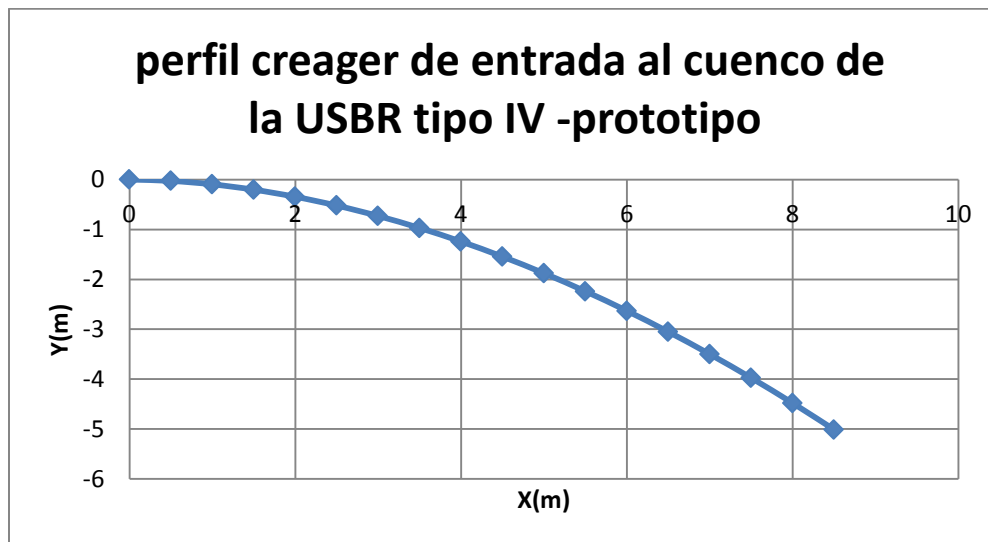


Figura 4-6. Diseño perfil Creager de entrada - alternativa 3 USBR IV



Los demás cálculos de los parámetros de diseño para el cuenco disipador se muestran a continuación (ver Tabla 4-1y Tabla 4-2):

H (m)	a (m)	z (m)	Y1 (m)	v 1 (m/s)	Y2 (m)	F	Q crecida (m ³ /s)	Lr/Y2	Lr (m)
12,8	7	5	3,709	16,627	12,722	2,757	370,000	5,100	65

Tabla 4-1. Resultados del diseño-alternativa 3 (5m de profundidad en el prototipo).

H (cm)	a (cm)	z (cm)	Y1 (cm)	v 1 (m/s)	Y2 (cm)	F	Q crecida (Lt/s)	Lr/Y2	Lr (cm)
25,6	14	10	7,418	2,35	25,444	2,757	20,93	5,100	130

Tabla 4-2. Resultados del diseño-alternativa 3 (10cm de profundidad en el modelo)

Donde:

- La altura contraída Y_1 y su velocidad v_1 se obtuvo mediante lo expuesto en el apartado 3.7.2.
- La altura secuente Y_2 se obtuvo con la ecuación 17 del apartado 2.5.2 y el número de Froude en Y_1 se obtuvo aplicando la ecuación 15 del apartado 2.3.4.
- La longitud del resalto se obtuvo mediante la tabla 2-8 de la USBR descrita en el apartado 2.5.4. Adicionalmente se obtuvieron otras longitudes de resalto descritas por diferentes autores en el apartado 2.5.4:

Longitudes del resalto adicionales		
Paulosky (m)	Silvester (m)	Chertousov (m)
51	64	60

Tabla 4-3. Longitudes de resalto alternativos.

La longitud de cuenco disipador solo se pudo establecer definitivamente una vez finalizado los ensayos, pero de manera preliminar, se optó por usar una longitud del cuenco igual a la longitud del resalto descrita por Paulosky antes de realizar los ensayos para la implementación del modelo de esta alternativa 3.

Un aspecto importante de señalar en el diseño de este cuenco disipador es la ausencia de bloques de entrada que van colocados sobre el perfil Creager; esto criterio se tomó ya que las dimensiones mostradas por el diseño son muy exageradas, lo que encarecería innecesariamente la obra además de dar problemas al momento de construirlas. Las dimensiones de estos bloques, calculados en base a la Figura 2-15 del apartado 2.6 se muestran en la Tabla 4-4 a continuación:

Diseño de bloques disipadores de entrada									
W ancho= 0,75*Y1		Alto= 2*Y1		Largo =2*Y1		espacio entre dados		espacio fraccional	
modelo cm	Proto . m	modelo cm	Proto . m	modelo cm	Proto . m	modelo cm	Proto . m	modelo cm	Proto . m
5,5	2,8	14,8	7,4	14,8	7,4	13,8	6,9	1,500	0,750

Tabla 4-4. Diseño de Bloques disipadores en la entrada del cuenco tipo IV USBR

A continuación se presenta un esquema donde se representa las dimensiones del diseño considerado para el prototipo (ver Figura 4-7).

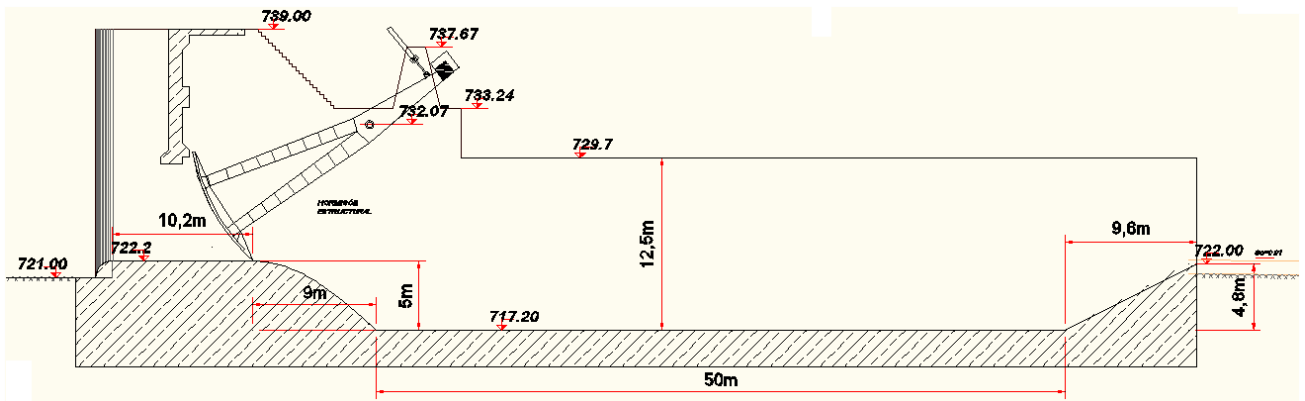


Figura 4-7. Alternativa 3: cuenco disipador USBR tipo IV-prototipo



Figura 4-8. Alternativa 3: cuenco disipador USBR tipo IV-Modelo

➤ **Variante a la alternativa 3: del cuenco disipador tipo IV de la USBR**

Como una alternativa más económica se planteó una variante a la alternativa IV de la USBR; esta variante tiene como diferencia la menor profundidad del cuenco disipador, de hasta 3m en el prototipo o 6cm en el modelo. El resto de parámetros se diseñaron con los mismos criterios que para el cuenco disipador con profundidad de 5m en prototipo, obteniendo los siguientes resultados:

H (m)	a (m)	z (m)	Y1 (m)	v 1 (m/s)	Y2 (m)	F	Q máximo (m ³ /s)	Lr/Y2	Lr (m)
12,8	7	3	4,0	15,174	11,90	2,452	370,000	4,900	58

Tabla 4-5. Variante al disipador de la alternativa 3 tipo IV de la USBR - Prototipo

H (cm)	a (cm)	z (cm)	Y1 (cm)	v 1 (m/s)	Y2 (cm)	F	Q máximo (Lt/s)	Lr/Y2	Lr (cm)

25,6	14	6	8,0	2,145	23,8	2,452	20,93	4,900	117
------	----	---	-----	-------	------	-------	-------	-------	-----

Tabla 4-6. Variante al dissipador de la alternativa 3 tipo IV de la USBR - Modelo

La Figura 4-10 y la Figura 4-10 muestran el esquema de esta variante a la alternativa 3, tanto en el prototipo como en el modelo.

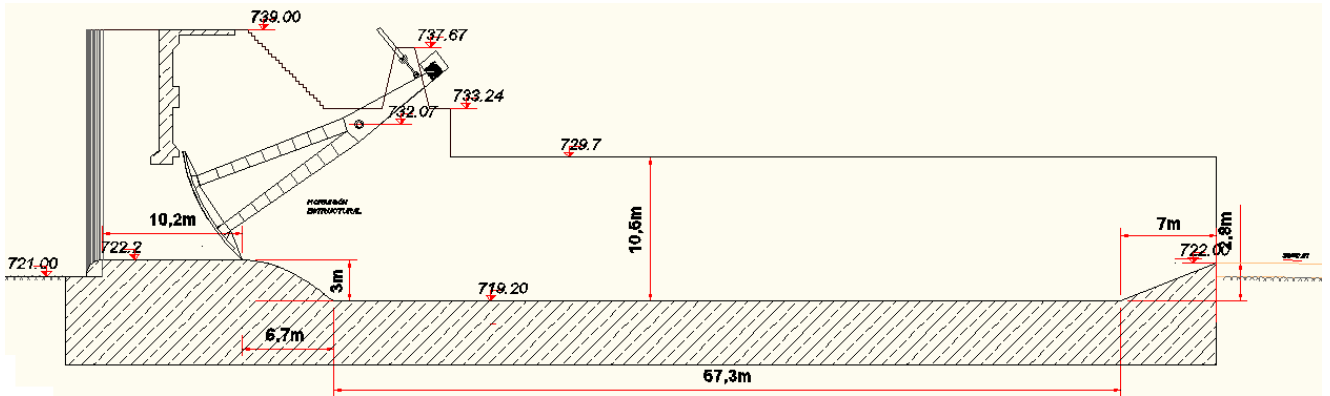


Figura 4-9. Variante a la alternativa 3. Prototipo



Figura 4-10. Variante a la alternativa 3. Modelo

Con el mismo criterio de diseño descrito en el dissipador tipo cuña, se obtuvo la siguiente Figura 4-11 que describe el perfil Creager de entrada al dissipador. Los cálculos se presentan en el Anexo A.2.2.3

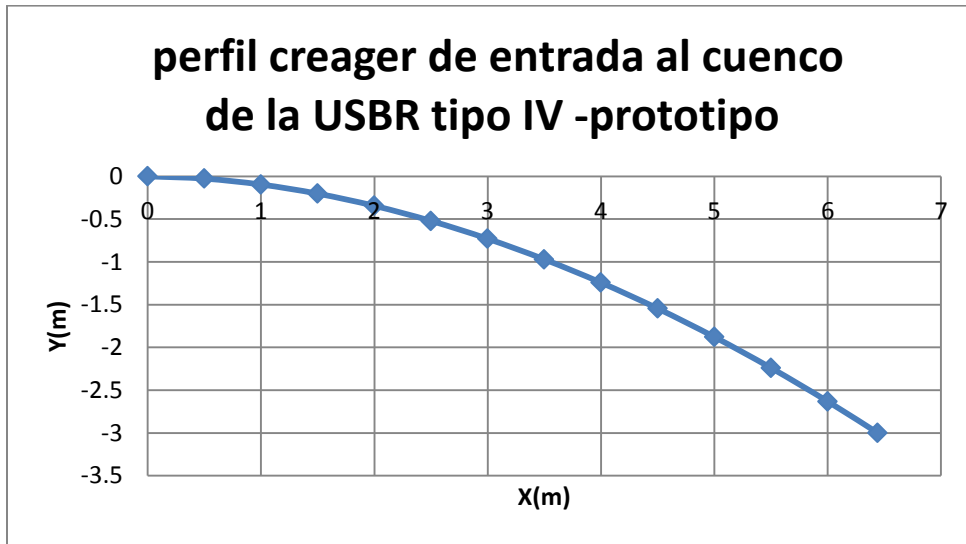


Figura 4-11. Perfil Creager, cuenco dissipador tipo IV USBR- prototipo



CAPITULO 5

5. RESULTADOS

Terminada la experimentación en todas las alternativas de diseño propuestas, se tienen las siguientes tablas de resultados para cada tipo de cuenco disipador.

5.1. Resultados de la alternativa 1 de cuenco disipador.

H (cm)	a (cm)	y2 (cm)	Y1 medido (cm)	y3 (cm)	LR (cm)	Y2' (cm)	H/a	Cd	Q (Lt/s)	v f (m/s)	tipo de resalto
25,6	2	2	2	2	no se forma	descarga libre	12,800	0,721	3,878	1,615	flujo supercrítico
10,5	4	3	3	3	no se forma	descarga libre	2,625	0,616	4,244	1,178	flujo supercrítico
15	6	4,5	4,5	4,5	no se forma	descarga libre	2,500	0,598	7,397	1,369	flujo supercrítico
24	10	7	7	7	no se forma	descarga libre	2,400	0,578	15,067	1,793	flujo supercrítico
25,6	14	9	9	9	no se forma	descarga libre	1,829	0,555	20,903	1,934	flujo supercrítico

Tabla 5-1. Resultado de los ensayos de la alternativa 1. Modelo

H (m)	a (m)	y2 (m)	Y1 medido (m)	y3 (m)	LR (m)	Y2' (m)	H/a	Cd	Q (m3/s)	Vf (m/s)	tipo de resalto
12,8	1	1	1	1	no se forma	descarga libre	12,800	0,721	68,510	11,418	flujo supercrítico
5,25	2	1,5	1,5	1,5	no se forma	descarga libre	2,625	0,616	74,982	8,331	flujo supercrítico
7,5	3	2,25	2,25	2,25	no se forma	descarga libre	2,500	0,598	130,681	9,680	flujo supercrítico
12	5	3,5	3,5	3,5	no se forma	descarga libre	2,400	0,578	266,195	12,676	flujo supercrítico
12,8	7	4,5	4,5	4,5	no se forma	descarga libre	1,829	0,555	369,309	13,678	flujo supercrítico

Tabla 5-2. Resultado de los ensayos de la alternativa 1. Prototipo



- Condiciones calado aguas abajo.

H (cm)	a (cm)	y2 (cm)	Y1 medido (cm)	Y1 calculado (cm)	V1 (m/s)	y3 (cm)	LR (cm)	Y2' (cm)	H/a	Cd	Q (Lt/s)	v f(m/s)	F	tipo de resalto	Posición del resalto (cm)
24,5	2	11	1,1	1,481	2,125	13	50	12	12,25	0,718	3,713	0,242	5,575	estable	50,5
14	2	8	1,8	1,468	1,568	10	30	10	7	0,694	2,715	0,230	4,132	oscilante	26
10,7	4	12	3	2,890	1,238	12	25	12	2,675	0,617	4,219	0,298	2,325	débil	
24,5	4	15	2,3	2,837	2,062	15	75	15	6,125	0,667	6,898	0,390	3,908	oscilante	85
15	6	11,5	3,5	4,240	1,453	14	35	14	2,5	0,598	7,266	0,440	2,253	Débil	27
24	6	16,5	4,3	4,156	1,973	17	76	18	4	0,630	9,671	0,482	3,090	oscilante	62
24	10	18	5,9	6,839	1,835	20	60	20	2,4	0,578	14,800	0,627	2,240	débil	50
25,6	14	20	9,1	9,929	1,753	22	68	22	1,829	0,555	20,534	0,791	1,777	débil	58

Tabla 5-3. Resultados ensayos con calado aguas arriba. alternativa 1 Modelo.

H (cm)	a (m)	y2 (m)	Y1 medido (m)	Y1 calculado (m)	V1 (m/s)	y3 (m)	LR (m)	Y2' (m)	H/a	Cd	Q (m3/s)	v f(m/s)	F	tipo de resalto	Posición del resalto
--------	-------	--------	---------------	------------------	----------	--------	--------	---------	-----	----	----------	----------	---	-----------------	----------------------



UNIVERSIDAD DE CUENCA

															(m)
12,25	1	5,5	0,55	0,7405	15,027	6,5	25	6	12,25	0,718	66,781	1,712	5,575	estable	25,25
7	1	4	0,9	0,734	11,088	5	15	5	7	0,694	48,826	1,628	4,132	oscilante	13
5,35	2	6	1,5	1,445	8,753	6	12,5	6	2,675	0,617	75,877	2,108	2,325	débil	
12,25	2	7,5	1,15	1,4185	14,578	7,5	37,5	7,5	6,125	0,667	124,05	2,757	3,908	oscilante	42,5
7,5	3	5,75	1,75	2,12	10,274	7	17,5	7	2,5	0,598	130,68	3,111	2,253	débil	13,5
12	3	8,25	2,15	2,078	13,953	8,5	38	9	4	0,63	173,94	3,411	3,09	oscilante	31
12	5	9	2,95	3,4195	12,975	10	30	10	2,4	0,578	266,19	4,437	2,24	débil	25
12,8	7	10	4,55	4,9645	12,399	11	34	11	1,829	0,555	369,30	5,596	1,777	débil	29

Tabla 5-4. Resultados de los ensayos con calado aguas arriba. alternativa 1. Prototipo

5.2. Resultaos de la alternativa 2 de cuenco disipador

- Descarga libre

H (cm)	a (cm)	y2 (cm)	Y1 medido (cm)	Y1 calculado (cm)	V1 (m/s)	y3 (cm)	LR (cm)	Y2' (cm)	H/a	Cd	Q (Lt/s)	vf (m/s)	F1	tipo de resalto
25	14		-	-	-	11	no se forma	descarga libre	1,786	0,554	20,628	1,562	-	Flujo supercrítico
19,5	14	15	13,5	8,4381	1,77	13	27	descar	1,39	0,54	17,98	1,15	1,951	Débil



UNIVERSIDAD DE CUENCA

					5			ga libre	3	7	6	2		
24,5	12		-	-	-	11	no se forma	descarga libre	2,04 2	0,56 3	17,77 2	1,34 6	-	Flujo supercrítico
19,5	12		-	-		11	no se forma	descarga libre	1,62 5	0,55 4	15,61 5	1,18 2	-	Flujo supercrítico
15	8	10	6	4,4917	1,74 4	10	30	descarga libre	1,87 5	0,57 1	9,407	0,78 4	2,628	Débil
25	8		-	-	-	6,9	no se forma	descarga libre	3,12 5	0,60 6	12,89 7	1,55 7	-	Flujo supercrítico
26	2		-	-		3	no se forma	descarga libre	13,0 0	0,72 1	3,912	1,08 6	-	Flujo supercrítico
12	2	4,7	1,5	1,2000	1,76 1	4,7	25	descarga libre	6,00 0	0,68 8	2,537	0,45 0	5,131	estable

Figura 5-1. Resultado de los ensayos- alternativa 2 de cuenco disipador. Modelo

H	a	y2	Y1	Y1	V1	y3	LR	Y2'	H/a	Cd	Q	vf	F1	tipo de
---	---	----	----	----	----	----	----	-----	-----	----	---	----	----	---------



UNIVERSIDAD DE CUENCA

(m)	(m)	(m)	medido (m)	calculado (m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)			(m ³ /s)	(m/s)		resalto
12,5	7		-	-	-	5,5	no se forma	descarga libre	1,786	0,554	364,453	11,044	-	Flujo supercrítico
9,75	7	7,5	6,75	4,219	12,553	6,5	13,5	descarga libre	1,393	0,547	317,768	8,148	1,951	Débil
12,25	6		-	-	-	5,5	no se forma	descarga libre	2,042	0,563	314,001	9,515	-	Flujo supercrítico
9,75	6		-	-	-	5,5	no se forma	descarga libre	1,625	0,554	275,876	8,360	-	Flujo supercrítico
7,5	4	5	3	2,246	12,334	5	15	descarga libre	1,875	0,571	166,206	5,540	2,628	Débil
12,5	4		-	-	-	3,45	no se forma	descarga libre	3,125	0,606	227,869	11,008	-	Flujo supercrítico
13	1		-	-	-	1,5	no se forma	descarga libre	13,00	0,721	69,125	7,681	-	Flujo supercrítico
6	1	2,35	0,75	0,600	12,449	2,35	12,5	descarga libre	6,000	0,688	44,820	3,179	5,131	estable

Figura 5-2. Resultados de los ensayos- alternativa 2. Prototipo



- Condiciones del calado aguas abajo del Rio.

H (cm)	a (cm)	y2 (cm)	Y1 medido (cm)	Y1 calculado (cm)	V1 (m/s)	y3 (cm)	LR (cm)	Y2' (cm)	H/a	Cd	Q (Lt/s)	v f(m/s)	F	tipo de resalto
25	14	18	10	8,333	2,062	18	70	17	1,78 6	0,55 4	20,628	0,954	2,28 0	Débil
24,5	12	18	11,5	7,054	2,099	18	54	17	2,04 2	0,56 3	17,772	0,822	2,52 3	Débil
19,5	12	16	13	7,023	1,852	16	35	14	1,62 5	0,55 4	15,615	0,813	2,23 1	Débil
25	8	15,5	6	4,834	2,222	15,5	60	15	3,12 5	0,60 6	12,897	0,693	3,22 7	oscilante
26	2	9,3	1,5	1,351	2,412	9,3	50	9	13,0 0	0,72 1	3,912	0,350	6,62 5	resalto estable

Tabla 5-5. Resultados alternativa 2. Modelo

H (m)	a (m)	y2 (m)	Y1 medido (m)	Y1 calculado (m)	V1 (m/s)	y3 (m)	LR (m)	Y2' (m)	H/a	Cd	Q (m3/s)	v f(m/s)	F	tipo de resalto
12,5	7	9	5	4,166	14,57 9	9	35	8,5	1,78 6	0,55 4	364,45 3	6,749	2,28 0	Débil
12,25	6	9	5,75	3,527	14,83 9	9	27	8,5	2,04 2	0,56 3	314,00 1	5,815	2,52 3	Débil



UNIVERSIDAD DE CUENCA

9,75	6	8	6,5	3,512	13,09 4	8	17, 5	7	1,62 5	0,55 4	275,87 6	5,747	2,23 1	Débil
12,5	4	7,75	3	2,417	15,71 2	7,75	30	7,5	3,12 5	0,60 6	227,86 9	4,900	3,22 7	oscilante
13	1	4,65	0,75	0,676	17,05 4	4,65	25	4,5	13,0 0	0,72 1	69,125	2,478	6,62 5	resalto estable

Tabla 5-6. Resultados alternativa 2. Prototipo



- Límite del resalto:

H (cm)	a (cm)	Y2'(cm)	H/a	Cd	Q (Lt/s)
19,5	14	18	1,393	0,547	17,986
24,5	12	18,5	2,042	0,563	17,772
19,5	12	18	1,625	0,554	15,615
25	8	17	3,125	0,606	12,897
15	8	12	1,875	0,571	9,407
26	2	10	13,000	0,721	3,912

Tabla 5-7. límites de resalto hidráulico. Alternativa 2. Modelo

H (cm)	a (cm)	Y2'	H/a	Cd	Q (Lt/s)
9,75	7	9	1,393	0,547	317,768
12,25	6	9,25	2,042	0,563	314,001
9,75	6	9	1,625	0,554	275,876
12,5	4	8,5	3,125	0,606	227,869
7,5	4	6	1,875	0,571	166,206
13	1	5	13,000	0,721	69,125

Tabla 5-8. límites del resalto hidráulico. alternativa 2. Prototipo



5.3. Resultados de la alternativa 3 del cuenco disipador

H (cm)	a (cm)	y2 (cm)	Y1 med (cm)	Y1 teor (cm)	V1 (m/s)	y3 (cm)	LR (cm)	Y2' (cm)	H/a	Cd	Q (Lt/s)	Vf (m/s)	F1	Tipo de resalto
24,8	2	16	1,6	1,2355	2,5661	4,5	66	Descarga libre	12,4	0,7187	3,807	0,7046	7,3709	estable
22,4	6	20	3,4	3,2944	2,3896	9	90	Descarga libre	3,7333	0,6259	9,452	0,8747	4,2035	oscilante
25,6	6	21,2	3,5	3,3859	2,5140	10,5	96	Descarga libre	4,2667	0,6330	10,220	0,8107	4,3622	oscilante
12	6	18	3	2,7596	1,9429	6,7	34	Descarga libre	2,0000	0,5824	6,438	0,8002	3,7342	oscilante
25,2	10	26	4,3	5,3378	2,4205	13	100	Descarga libre	2,5200	0,5811	15,513	0,9939	3,3450	Oscilante
15	10	21,5	5,6	4,7749	1,9920	11,6	53	Descarga libre	1,5000	0,5545	11,421	0,8200	2,9106	Oscilante
25	14	26,5	7,5	7,3804	2,3278	15,8	112	Descarga libre	1,7857	0,5541	20,628	1,0874	2,7358	Oscilante

Tabla 5-9. . Resultados de los ensayos alternativa 3-profundidad del cuenco 10cm-Modelo

H (m)	a (m)	y2 (m)	Y1 med (m)	Y1 teor (m)	V1 (m)	y3 (cm)	LR (m)	Y2' (m)	H/a	Cd	Q (m/s)	Vf (m/s)	F1	Tipo de resalto
12,4	1	8	0,8	0,6178	18,1451	2,25	33	Descarga libre	12,4	0,7187	67,2615	4,9823	7,3709	estable
11,2	3	10	1,7	1,6472	16,8970	4,5	45	Descarga libre	3,7333	0,6259	166,9965	6,1851	4,2035	oscilante



UNIVERSIDAD DE CUENCA

12,8	3	10,6	1,75	1,6930	17,776 7	5,25	48	Descarga libre	4,2667	0,633	180,5654	5,732 5	4,362 2	oscilante
6	3	9	1,5	1,3798	13,738 4	3,35	17	Descarga libre	2	0,582 4	113,7456	5,658 3	3,734 2	oscilante
12,6	5	13	2,15	2,6689	17,115 5	6,5	50	Descarga libre	2,52	0,581 1	274,0813	7,027 9	3,345	Oscilante
7,5	5	10,7	2,8	2,3875	14,085 6	5,8	26, 5	Descarga libre	1,5	0,554 5	201,7845	5,798 3	2,910 6	Oscilante
12,5	7	13,2	3,75	3,6902	16,460 0	7,9	56	Descarga libre	1,7857	0,554 1	364,4523	7,689 1	2,735 8	Oscilante

Tabla 5-10. Resultados de los ensayos alternativa 3- profundidad del cuenco 5m prototipo



A continuación se muestran los calados límites de los resaltos hidráulicos es decir los valores para los cuales el resalto hidráulico pasa a sumergirse, para esto se tuvo que manipular los calados aguas abajo del Rio Y2'. Cabe mencionar que los datos de la variables del resalto hidráulico (Y1,Y2,LR) además de F1 y el tipo de resalto se mantienen, lo único que cambia es la posición del resalto:

H (cm)	a (cm)	Y3=Y2' (cm)	H/a	Cd	Q (Lt/s)	vf(m/s)
22	6	8	3,6667	0,6248	9,3515	0,9741
24,5	6	12	4,0833	0,6309	9,9642	0,6920
25,6	6	12	4,2667	0,6330	10,2204	0,7098
12	6	8	2,0000	0,5824	6,4375	0,6706
12	6	12	2,0000	0,5824	6,4375	0,4471
25,2	10	16	2,5200	0,5811	15,5131	0,8080
25	14	17	1,7857	0,5541	20,6281	1,0112

Figura 5-3. límite del resalto hidráulico. Modelo

H (m)	a (m)	y3(m)	Y2' (m)	H/a	Cd	Q (m3/s)	Vf (m/s)
11	3	4	4	3,6667	0,6248	165,2206	6,8880
12,25	3	6	6	4,0833	0,6309	176,0457	4,8928
12,8	3	6	6	4,2667	0,6330	180,5728	5,0187
6	3	4	4	2,0000	0,5824	113,7376	4,741
6	3	6	6	2,0000	0,5824	113,7376	3,1611
12,6	5	8	8	2,5200	0,5811	274,0825	5,7132
12,5	7	8,5	8,5	1,7857	0,5541	364,4532	7,1501

Figura 5-4.límite del resalto hidráulico - prototipo



5.3.1. Variante a la alternativa 3: -3m de profundidad del cuenco en el prototipo.

H (cm)	a (cm)	y2 (cm)	Y1 medido (cm)	Y1 calculado (cm)	V1 (m/s)	y3 (cm)	LR (cm)	Y2' (cm)	H/a	Cd	Q (Lt/s)	Vf (m/s)	F1	tipo de resalto
25	14	22,5	3,15	8,1066	2,1193	16	93	descarga libre	1,7857	0,554	20,6281	1,0744	2,3765	oscilante
21,5	14	21,7	6	8,1001	1,9510	15	77	descarga libre	1,5357	0,549	18,9749	1,0542	2,1887	oscilante
24	10	20,8	5	5,7533	2,1811	14,8	86	descarga libre	2,4000	0,578	15,0667	0,8483	2,9032	oscilante
17	10	18,5	5	5,5258	1,8516	12,2	61,5	descarga libre	1,7000	0,560	12,2845	0,8391	2,5148	oscilante
17,9	6	16	3	3,4292	2,0041	10,2	68,5	descarga libre	2,9833	0,611	8,2514	0,6741	3,4553	oscilante
24,8	6	18,5	1,2	3,6193	2,3092	11,8	103	descarga libre	4,1333	0,631	10,0349	0,7087	3,8755	oscilante
25	2	12,3	0,6	1,3200	2,4131	6	64,5	descarga libre	12,500	0,719	3,8246	0,5312	6,7059	estable
14,7	2	10,8	0,7	1,2089	1,9555	4,9	47,5	descarga libre	7,3500	0,696	2,8384	0,4827	5,6786	estable

Figura 5-5. Resultados de los ensayos - variante de la alternativa 3. Modelo.

H (m)	a (m)	y2 (m)	Y1 medido (m)	Y1 calculado (m)	V1 (m/s)	y3 (m)	LR (m)	Y2' (m)	H/a	Cd	Q (m3/s)	Vf (m/s)	F1	tipo de resalto
12,5	7	11,25	1,575	4,0533	14,9858	8	46,5	descarga libre	1,7857	0,5541	364,4532	7,5928	2,3765	oscilante



UNIVERSIDAD DE CUENCA

10,7 5	7	10,8 5	3	4,0501	13,795 8	7,5	38,5	descarga libre	1,535 7	0,549 6	335,24 47	7,449 9	2,188 7	oscilant e
12	5	10,4	2,5	2,8767	15,422 7	7,4	43	descarga libre	2,400 0	0,578 3	266,19 54	5,995 4	2,903 2	oscilant e
8,5	5	9,25	2,5	2,7629	13,092 6	6,1	30,7 5	descarga libre	1,700 0	0,560 2	217,04 01	5,930 1	2,514 8	oscilant e
8,95	3	8	1,5	1,7146	14,170 9	5,1	34,2 5	descarga libre	2,983 3	0,611 2	145,78 38	4,764 2	3,455 3	oscilant e
12,4	3	9,25	0,6	1,8096	16,328 8	5,9	51,5	descarga libre	4,133 3	0,631 5	177,29 46	5,008 3	3,875 5	oscilant e
12,5	1	6,15	0,3	0,6600	17,063 5	3	32,2 5	descarga libre	12,50 0	0,719 1	67,572 7	3,754 0	6,705 9	estable
7,35	1	5,4	0,35	0,6044	13,827 8	2,4 5	23,7 5	descarga libre	7,350 0	0,696 0	50,147 7	3,411 4	5,678 6	estable

Figura 5-6. Resultados de los ensayos- variante de la alternativa 3. Prototipo



A continuación se muestran los límites del resalto según las condiciones del calado aguas abajo Y2':

H (cm)	a (cm)	y3(cm)=Y2' (cm)	H/a	Cd	Q (Lt/s)	Vf (m/s)
25	14	19	1,7857	0,5541	20,6281	0,9047
21,5	14	17	1,5357	0,5496	18,9749	0,9301
24	10	16	2,4000	0,5783	15,0667	0,7847
17	10	14	1,7000	0,5602	12,2845	0,7312
17,9	6	12	2,9833	0,6112	8,2514	0,5730
24,8	6	14	4,1333	0,6315	10,0349	0,5973
25	2	8	12,5000	0,7191	3,8246	0,3984
14,7	2	6	7,3500	0,6960	2,8384	0,3942

Figura 5-7. límites del resalto. variante de la alternativa 3

H (m)	a (m)	y3(m)=Y2' (m)	H/a	Cd	Q (m3/s)	Vf (m/s)
12,5	7	9,5	1,7857	0,5541	364,4532	6,3974
10,75	7	8,5	1,5357	0,5496	335,2447	6,577
12	5	8	2,4000	0,5783	266,1953	5,5488
8,5	5	7	1,7000	0,5602	217,0401	5,1704
8,95	3	6	2,9833	0,6112	145,7838	4,0518
12,4	3	7	4,1333	0,6315	177,2945	4,2236
12,5	1	4	12,5000	0,7191	67,57273	2,8170
7,35	1	3	7,35	0,6959	50,14767	2,7875

Figura 5-8. límites del resalto. Variante de la alternativa 3

5.4. Comparación de resultados de las alternativas propuestas

A continuación se presenta las comparaciones de resultados obtenidos de disipación de energía, donde se muestran gráficas representativas de las características del resalto como son la eficiencia, además de otros parámetros de diseño importantes como la velocidad de salida, el calado aguas abajo del Rio Y2' y longitudes de Resalto. Todas las graficas se construyeron en función del caudal.

- Eficiencia del resalto:

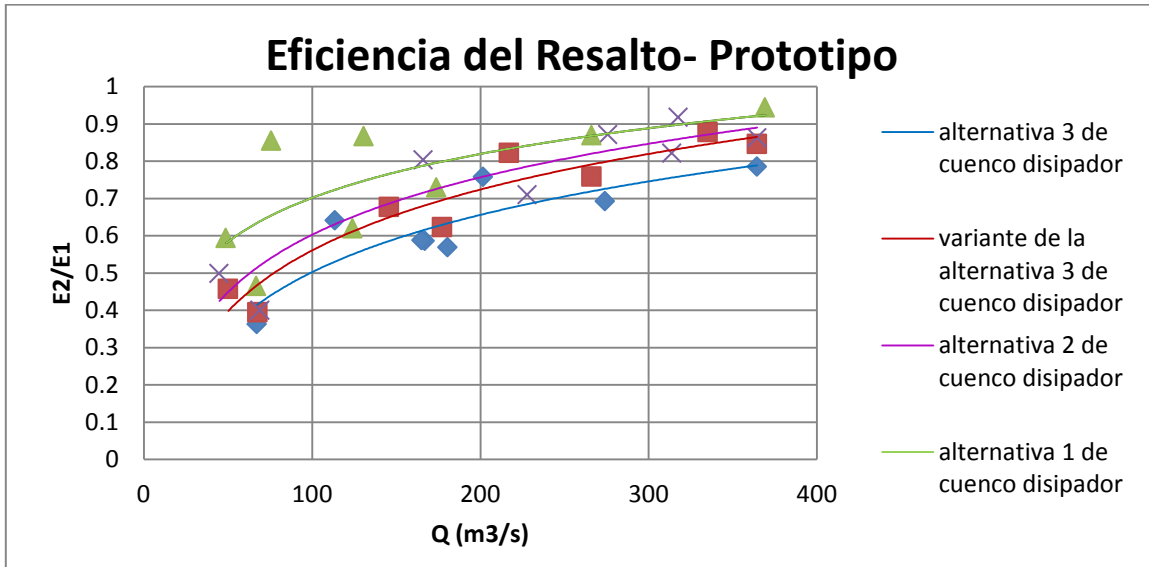


Figura 5-9.. Curva de eficiencia del resalto vs. caudal - Prototipo

- Velocidad de salida

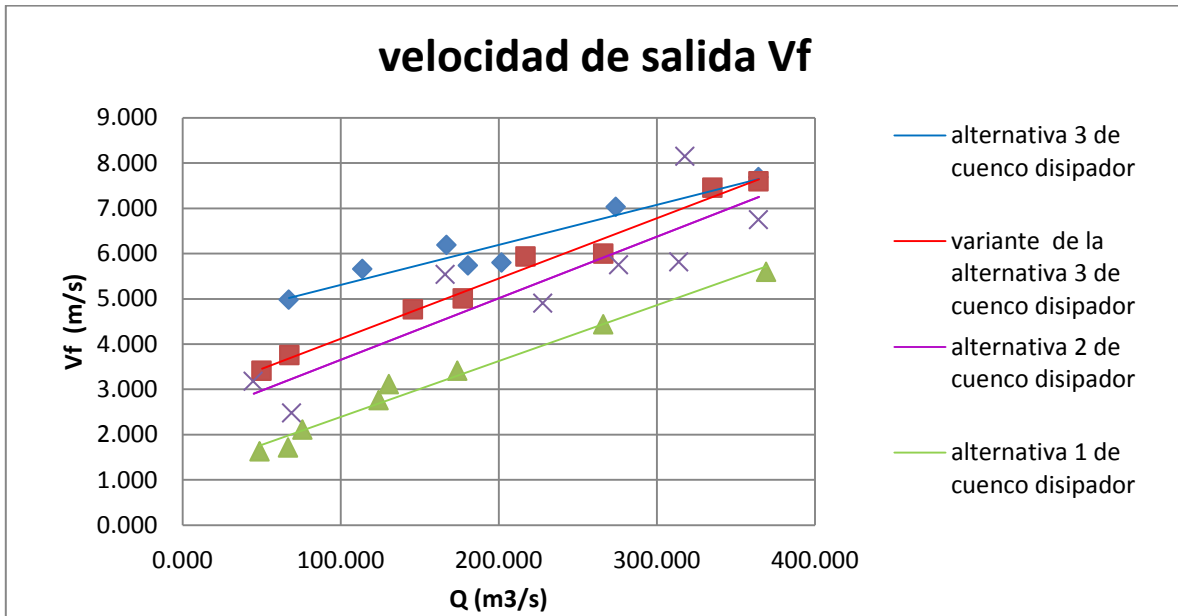


Figura 5-10. Curva de caudal vs. Velocidad de salida del canal - Prototipo

- Calado de salida del cuenco

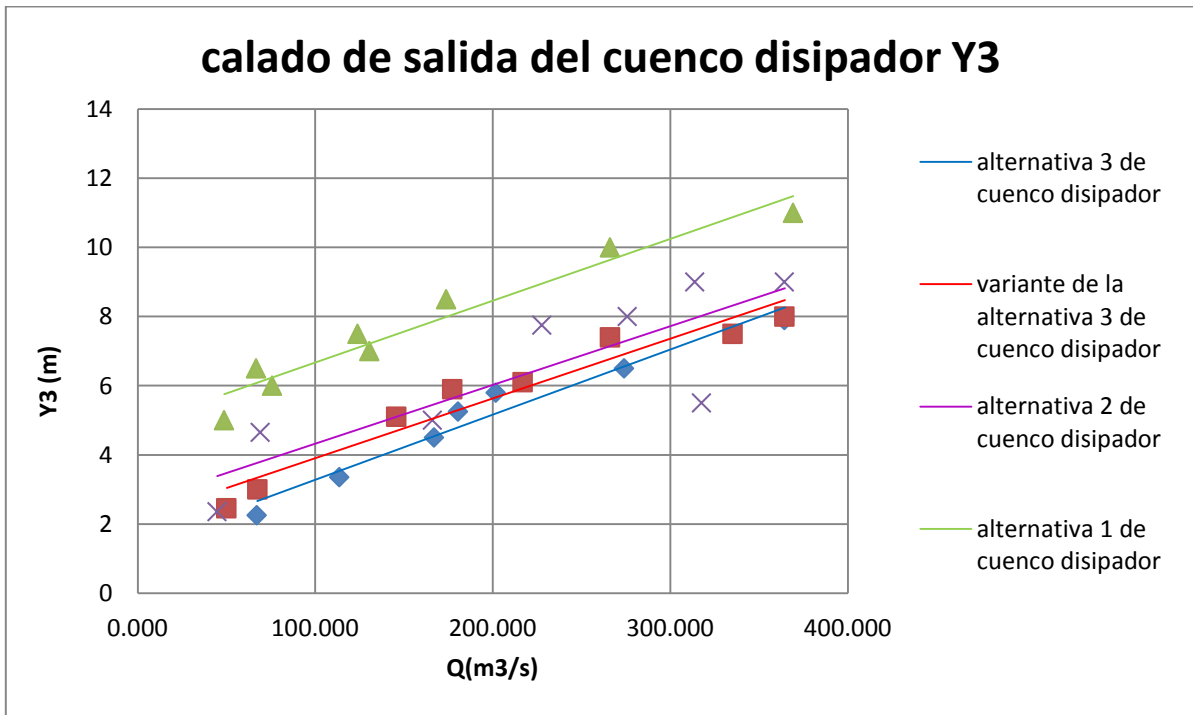


Figura 5-11. Curva de caudal vs. calado de salida del disipador. Prototipo

- Longitud del Resalto

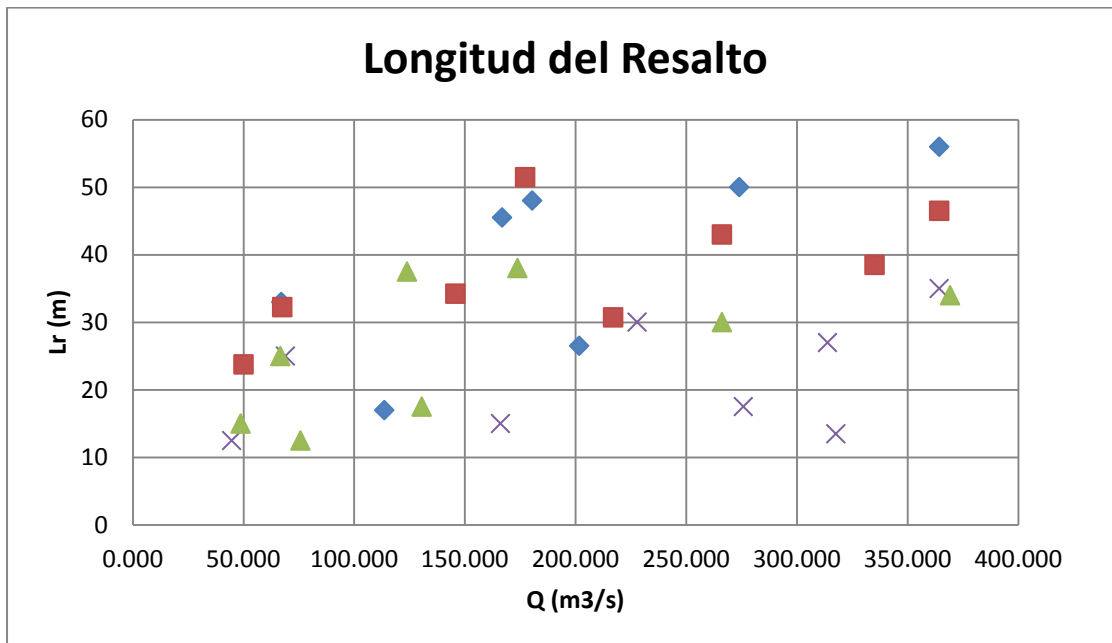


Figura 5-12. Curva de caudal vs. longitud del resalto. Prototipo

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos mediante las comparaciones realizadas, además se analizan ciertas observaciones y fenómenos que se presentaron durante la etapa de experimentación.

Las Figura 5-9 muestra una gran eficiencia para la alternativa 1 de cuenco disipador llegando inclusive hasta valores superiores al 90% para caudales máximos de 370m³/s, además se alcanzan velocidades de salida mucho menores a los erosivos de 11m/s llegando a alrededor de los 6 m/s para caudales máximos en el prototipo, pero la desventaja de esta alternativa 1 es evidencia en la Figura 5-11 donde se hace necesario calados del río aguas abajo (Y2') muy exageradas para su correcto funcionamiento e inclusive para garantizar la formación del resalto hidráulico dentro del cuenco; lo cual, según las condiciones morfológicas actuales del Río al final del disipador de energía, lo haría muy complicado y costoso el conseguir. Dichos calados que llegan hasta los 11m en el caso de la descarga máxima.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Otra desventaja de esta alternativa 1 es la posición del resalto, la cual, si bien se tiene longitudes de resaltos relativamente igual a la media de las demás alternativas (ver Figura 5-12), se hace evidente, en los datos de la Tabla 5-4, las posiciones del resalto de hasta 42m que incluido el resalto hidráulico, donde se tiene una longitud del cuenco disipador en algunos caso de hasta de 70m para caudales de $124,5\text{m}^3/\text{s}$ y calados de salida de 7,5m en el prototipo.

La eficiencia de esta alternativa 2 de cuenco disipador disminuye ligeramente hasta valores de 85% para caudales máximos de $370\text{m}^3/\text{s}$ e inclusive llegando hasta valores máximos de 90% para caudales próximos a los $320\text{m}^3/\text{s}$ en el prototipo. Las velocidades también aumentan, aunque no de manera drástica, hasta valores de 7m/s para caudales máximos de $370\text{m}^3/\text{s}$ en el prototipo, lo cual está dentro de un rango aceptable para evitar efectos erosivos.

Una disminución notable que se muestra para la alternativa 2 es en la altura del calado a la salida de cuenco (Y3), donde se muestran valores de hasta 8,5m para caudales máximos de $370\text{m}^3/\text{s}$ en el prototipo.

Una de las mayores ventajas de esta alternativa 2 son las longitudes del resalto que sufren una considerable disminución llegando a valores de hasta 35m para caudales máximos esperados de $370\text{m}^3/\text{s}$ en el prototipo. Esto se debe a que los resaltos hidráulicos tienden a formarse dentro del cuenco tipo cuña presentada en esta alternativa.

La alternativa 3 según los gráficos de comparación, son los que peores resultados se obtuvieron en la eficiencia de disipación de energía, aunque con un rango aceptable de hasta 80% de disipación para caudales máximos, además se obtuvieron velocidades de hasta 8m/s de salida V_f muy cerca a las velocidades límites impuestas de 10m/s, y en el caso de las longitudes de resalto se muestran como las mayores obtenidas a valores de hasta 60m.

Una leve ventaja se puede notar en los valores del calado de salida del cuenco, llegando a valores máximos de 8m.

La última propuesta analizada, la variante de alternativa 3, presenta datos similares a los del cuenco de la alternativa 3 con respecto a la longitud de Resalto, aunque con disminuciones en la velocidades de salida para valores de hasta $300\text{m}^3/\text{s}$, pero ,a partir de este caudal, las velocidades se empiezan a igualar llegando al máximo de la alternativa 3 de 8m/s ; así mismo se notan pequeñas disminuciones de calado de salida para caudales menores de $300\text{m}^3/\text{s}$. En el caso de la eficiencia del cuenco no tiene diferencias significativas con la alternativa 2 llegando a valores similares de hasta 80% para caudales máximos de $370\text{m}^3/\text{s}$.

Un análisis importante de mencionar es la total dependencia tanto de la alternativa 1 como de la alternativa 2 de los calados aguas abajo del Rio para formar el resalto hidráulico, ya que al no cumplir dichos calados el resalto desaparece formándose flujos supercríticos que llegan a valores de hasta 13,5 m/s de velocidad en descargas máximas.

En el anexo se presentan algunas fotografías referentes al ensayo donde se puede verificar y evidenciar los análisis expuestos. (ver anexo A.3)

6.1. Observaciones .

- Tipo de resalto

En los resultados obtenidos tanto en la alternativa 3 como en su variante, se determinó que un tipo de resalto era el dominante para casi todos los caudales ensayados, el resalto Oscilante; teniendo como excepción las descargas menores de $70\text{m}^3/\text{s}$ donde se presenta un Resalto Estable.

El resalto oscilante desarrolla según la teórica ondas largas de periodo irregular. Cada oscilación irregular produce una ola grande la cual viaja lejos hacia aguas abajo y puede crear grandes problemas de erosión, estas ondas se evidencian claramente en las siguiente imágenes, donde se pudo tener una medida aproximada de las olas producidas para el máximo caudal de descarga $370\text{m}^3/\text{s}$.

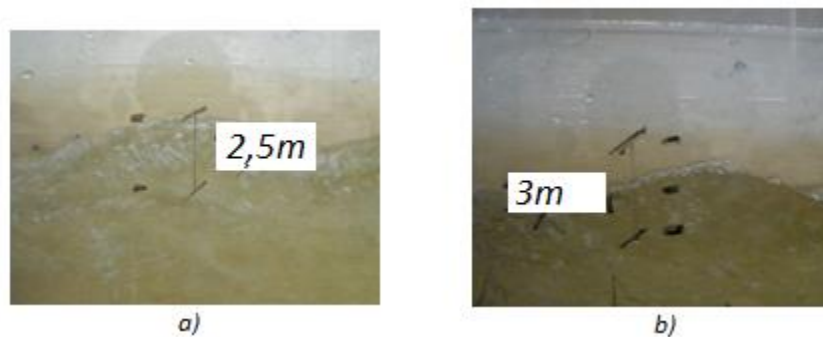


Figura 6-1. amplitud de la onda producida del resalto oscilante. a) variante Alternativa 3 Máxima descarga; b) alternativa 3. Máxima descarga

Por otra parte tanto en la alternativa 1 como en la alternativa 2 de cuenco disipador se presentan predominantemente resaltos débiles para caudales altos y en los pocos casos que se presentaron resaltos oscilante no produjeron olas

apreciables y que pudieran afectar la obra. Dichas olas llegaron a amplitudes máximas a 0,3m y de manera intermitente.

- Arrastre de materiales.

Este parámetro observacional se desarrolló con el propósito de obtener tamaños mínimos aproximados que se podrán utilizar en el enrocado o zampeado al final del cuenco disipador, necesario para resistir la erosión y socavamiento al final de la misma.

A continuación se muestran figuras Figura 6-2, Figura 6-3 y Figura 6-4 donde se evidencia la efectividad de material de 3m como enrocado o zampeado al final del cuenco disipador para máximos caudales en cada alternativa.



Figura 6-2. arrastre de material - descarga máxima alternativa 1



Figura 6-3. arrastre de material - descarga máxima alternativa 2. Prototipo



Figura 6-4. arrastre de material. variante de alternativa 3. Modelo

El único caso en el cual no se obtuvieron resultados concretos en el arrastre de material es para la alternativa 3 donde parece haber una arrastre mayor al material de a 3m.

- Diseño de Pilas al Final del cuenco disipador

Como se mencionó en los ensayos preliminares o en las pre-evaluaciones realizadas a la estructura original (ver apartado 3.7.1) fue necesario la implementación de un diseño semicircular de pilas con el fin de evitar esta contracción del flujo que se produce a la salida del cuenco. Las pilas son cilindros semicirculares con radio igual al ancho de los muros para los canales del cuenco disipador. La altura de estas pilas al final dependerá de la alternativa de disipador de energía que se elija.

A continuación se muestra un grafico de comparación entre la estructura original con y sin pilas al final de la misma y su efectividad al reducir o eliminar la contracción del flujo:



Figura 6-5. a) estructura original del cuenco sin pilas al final. b) estructura original del cuenco con implementacion de pilas al final.

7. CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalmente realizado todas las campañas de experimentación como sus respectivos análisis de comportamiento y desempeño tanto de del diseño original como las alternativas de diseño presentadas, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Posterior a la pre- evaluación del diseño original de dissipador de energía propuesto por la empresa HIDROSANBARTOLO S.A, se concluye que la eficiencia en la disipación no fue la adecuada, razón por la cual fue preciso continuar con el estudio de la disipación de energía con las tres alternativas propuestas y sus respectivas variantes. Así mismo en base a estas pre-evaluaciones realizadas se determino una baja eficiencia en el desempeño de la compuerta pequeña para el lavado de sedimentos, por este motivo no se tomó en cuenta para el estudio.
- Se pudo identificar también en base a estas pre-evaluaciones un parámetro de control de socavamiento en el lecho del Rio al final del cuenco dissipador. Estos parámetros son la velocidad de salida y el tamaño del material necesario para el zampeado o enrocado al final del cuenco dissipador; los cuales se recomendaron menores a 10 m/s para caudales máximos y tamaños mayores a 3m respectivamente.
- Es recomendable por otra parte, indistintamente del tipo de dissipadores que se puedan o no seleccionar como adecuados para el proyecto, la implementación de pilas redondeadas al final de los dissipadores, tal y como se determinó en el capítulo 4, ya que como se pudo observar en la Figura



UNIVERSIDAD DE CUENCA

6-5, estas pilas tienen un muy buen funcionamiento para evitar la contracción del flujo y con esto posteriores problemas de socavación.

- La variante de la alternativa 3 (cuenco disipador tipo IV de la USBR-3m de profundidad) es la más recomendable en esta obra en particular cuando se presenten caudales extremos de crecida en el Río de $1200\text{m}^3/\text{s}$ correspondientes al periodo de retorno de 100 años donde se evacua una descarga máxima por cada compuerta de hasta $370\text{m}^3/\text{s}$, ya que en esta alternativa la formación del resalto no dependerá de las condiciones del calado aguas abajo, además las velocidades máximas de salida que se consiguen son de $8\text{m}/\text{s}$, por debajo de la velocidad erosiva de $10\text{m}/\text{s}$ impuesta según las pre evaluaciones. La longitud del cuenco se recomienda un mínimo de 50m según el análisis.
- Para el caso en que se considere como caudal de diseño al caudal medio anual del Río de $75\text{m}^3/\text{s}$ es recomendable que las compuertas operen con una abertura máxima de 1m, ya que con esta abertura se tendrán casi $70\text{m}^3/\text{s}$ de descarga máxima por compuerta, suficientes para evacuar dicho caudal y realizar el proceso de lavado en las compuertas. En estas condiciones de operación, el diseño más adecuado económico y eficiente para el cuenco disipador correspondería a la alternativa 2 (tipo cuña) siempre y cuando se pueda mantener un calado aguas abajo de por lo menos 5m en el Río, donde se presentarán velocidades de salida eficientes de $2,5\text{m}/\text{s}$, con una longitud del cuenco mínima recomendable de 25m.

En su defecto al no poder cumplir con las condiciones del calado aguas abajo, la variante de alternativa 3 es recomendable para una longitud de cuenco de 30m en donde se tendrán velocidades de salida de hasta $3,7\text{m}/\text{s}$, muy por debajo de las erosivas.

- En resumen y según lo evidenciado en este estudio se recomienda la utilización de la variante de la alternativa 3 en el diseño del cuenco disipador para la evacuación de caudales mayores a $100\text{m}^3/\text{s}$ por compuerta.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

BIBLIOGRAFIA

- Naudascher, E., Castro, M.: *"Hidráulica de Canales"*, Limusa-Noriega Editores, México, 2000



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- United States Department of the Interior, USBR.: “*Design of Small Canal Structures*”, a Water Resources Technical Publication, Denver, Colorado., 1974
- Rocha, A. Los modelos como herramienta para el diseño hidráulico
- Chanson, H. Hidráulica del flujo en canales abiertos. Mc Graw Hill.
- Chow, V. T, Hidráulica de canales abiertos. Mc Graw.
- French, R H, Hidráulica de Canales Abiertos. Mc Graw Hill.
- U.S.B.R. (Bureau of Reclamation), DESIGN OF SPILLWAY TAINTER GATES. USA (2000).
- U.S.B.R. (Bureau of Reclamation). Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators
- Sotelo, G. Hidráulica General Vol 1. Fundamentos. Limusa Noriega.
- Canizalez Casillas, R. Apuntes sobre teoría de modelos de obras hidráulicas a superficie libre. Universidad de Sonora, México.
- Streeter ,V. Wylie B. Bedford K. Mecanica de fluidos (Novena ed). Mc Graw-Hill. (2000).



ANEXOS

A.1 Cálculos:

A.1.1 Datos para la Construcción de la Curva de descarga.

H		a		H/a	Cd	Q (m ³ /s)
Modelo (cm)	Prototipo (m)	Modelo (cm)	Prototipo (m)			
4	2	2	1	2	0,608	22,854
6	3	2	1	3	0,641	29,551
8	4	2	1	4	0,664	35,329
10	5	2	1	5	0,679	40,368
12	6	2	1	6	0,688	44,819
14	7	2	1	7	0,694	48,825
16	8	2	1	8	0,698	52,519
18	9	2	1	9	0,702	56,016
20	10	2	1	10	0,706	59,401
22	11	2	1	11	0,711	62,722
24	12	2	1	12	0,716	65,980
26	13	2	1	13	0,721	69,125

H		a		H/a	Cd	Q (m ³ /s)
Modelo (cm)	Prototipo (m)	Modelo (cm)	Prototipo (m)			
6	3	4	2	1,500	0,574	52,800
8	4	4	2	2,000	0,594	63,187
10	5	4	2	2,500	0,612	72,716
12	6	4	2	3,000	0,626	81,528
14	7	4	2	3,500	0,638	89,703
16	8	4	2	4,000	0,647	97,297
18	9	4	2	4,500	0,654	104,356
20	10	4	2	5,000	0,660	110,920
22	11	4	2	5,500	0,664	117,023
24	12	4	2	6,000	0,666	122,700
26	13	4	2	6,500	0,668	127,979



UNIVERSIDAD DE CUENCA

H		a		H/a	Cd	Q (m3/s)
Modelo (cm)	Prototipo (m)	Modelo (cm)	Prototipo (m)			
8	4	6	3	1,333	0,556	88,602
10	5	6	3	1,667	0,570	101,585
12	6	6	3	2,000	0,582	113,738
14	7	6	3	2,333	0,593	125,191
16	8	6	3	2,667	0,603	136,023
18	9	6	3	3,000	0,612	146,284
20	10	6	3	3,333	0,619	156,008
22	11	6	3	3,667	0,625	165,221
24	12	6	3	4,000	0,630	173,941
26	13	6	3	4,333	0,634	182,184

H		a (m)		H/a	Cd	Q (m3/s)
modelo (cm)	Prototipo (m)	Modelo (cm)	Prototipo (m)			
10	5	8	4	1,250	0,548	130,207
12	6	8	4	1,500	0,558	145,175
14	7	8	4	1,750	0,567	159,360
16	8	8	4	2,000	0,575	172,904
18	9	8	4	2,250	0,583	185,897
20	10	8	4	2,500	0,590	198,407
22	11	8	4	2,750	0,597	210,484
24	12	8	4	3,000	0,603	222,166
26	13	8	4	3,250	0,609	233,486

H		a		H/a	Cd	Q (m3/s)
modelo (cm)	Prototipo (m)	modelo (cm)	Prototipo (m)			
12	6	10	5	1,200	0,545	177,488
14	7	10	5	1,400	0,551	193,885
16	8	10	5	1,600	0,557	209,490
18	9	10	5	1,800	0,563	224,440
20	10	10	5	2,000	0,568	238,830
22	11	10	5	2,200	0,573	252,730
24	12	10	5	2,400	0,578	266,195



26	13	10	5	2,600	0,583	279,265
----	----	----	---	-------	-------	---------

H		a		H/a	Cd	Q (m ³ /s)
Modelo (cm)	Prototipo (m)	Modelo (cm)	Prototipo (m)			
14	7	12	6	1,167	0,544	229,527
16	8	12	6	1,333	0,548	247,051
18	9	12	6	1,500	0,551	263,775
20	10	12	6	1,667	0,555	279,833
22	11	12	6	1,833	0,558	295,324
24	12	12	6	2,000	0,562	310,322
26	13	12	6	2,167	0,565	324,885

H		a		H/a	Cd	Q (m ³ /s)
modelo (cm)	Prototipo (m)	Modelo (cm)	Prototipo (m)			
16	8	14	7	1,143	0,542	285,438
18	9	14	7	1,286	0,545	304,213
20	10	14	7	1,429	0,548	322,198
22	11	14	7	1,571	0,550	339,518
24	12	14	7	1,714	0,553	356,268
26	13	14	7	1,857	0,555	372,523

A.1.2 Validación de la curva de descarga.

A.1.2.1 Datos de ensayos de aforamiento del modelo:

- **Abertura 2cm modelo**

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo (L/s)	Q Prototipo (m ³ /s)	Cd	H/a
26,5	30	0,038	2	14,5	3,000	53,004	0,741	7,25
26,5	30	0,037	2	14,5	2,972	52,508	0,734	7,25
26,5	30	0,038	2	14,5	3,046	53,816	0,752	7,25

Media **53,109**

hc	bc	vel de aforo	a	H	Q Modelo	Q Prototipo	Cd	H/a
----	----	--------------	---	---	----------	-------------	----	-----



UNIVERSIDAD DE CUENCA

(cm)	(cm)	(m/s)	(cm)	cm	L/s	(m ³ /s)		
34,9	30	0,037	2	22,7	3,8240	67,5611	0,755	11,35
34,9	30	0,036	2	22,7	3,7675	66,5644	0,743	11,35
34,9	30	0,036	2	22,7	3,7866	66,9014	0,747	11,35
Media						67,0090		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q. Modelo (L/s)	Q. Prototipo (m ³ /s)	Cd	H/a
22	30	0,035	2	9,9	2,3496	41,5123	0,7024	4,95
22	30	0,032	2	9,9	2,1186	37,4310	0,6333	4,95
22	30	0,032	2	9,9	2,1349	37,7205	0,6382	4,95
Media						38,888		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m ³ /s)	Cd	H/a
27	30	0,038	2	14,7	3,080	54,423	0,756	7,35
27	30	0,040	2	14,7	3,203	56,587	0,786	7,35
27	30	0,042	2	14,7	3,375	59,631	0,828	7,35
27	30	0,040	2	14,7	3,280	57,947	0,805	7,35
Media						56,3191		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m ³ /s)	Cd	H/a
26	30	0,043	2	15	3,3608	59,3791	0,81628	7,5
26	30	0,042	2	15	3,3203	58,6630	0,80644	7,5
26	30	0,040	2	15	3,1858	56,2869	0,77373	7,5
Media						58,1097		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m ³ /s)	Cd	H/a
24	30	0,042	2	12,7	3,0625	54,1082	0,8083	6,35
24	30	0,041	2	12,7	2,9875	52,7836	0,7885	6,35
Media						52,8055		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m ³ /s)	Cd	H/a
------------	------------	-----------------------	-----------	---------	-----------------	------------------------------------	----	-----



UNIVERSIDAD DE CUENCA

37,7	30	0,035	2	26	3,9587	69,9417	0,7303	13
37,7	30	0,038	2	26	4,2987	75,9496	0,7930	13
37,7	30	0,034	2	26	3,8866	68,6678	0,7170	13
Media						71,5197		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
18,8	30	0,036	2	6,6	2,0157	35,6135	0,7381	3,3
18,8	30	0,037	2	6,6	2,0629	36,4472	0,7553	3,3
18,8	30	0,037	2	6,6	2,1068	37,2233	0,7714	3,3
Media						36,4280		

• Abertura 6cm en el modelo

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
37,5	30	0,090	6	25,6	10,0915	178,2955	0,6254	4,2667
37,5	30	0,089	6	25,6	10,0004	176,6848	0,6197	4,2667
37,5	30	0,088	6	25,6	9,9279	175,4045	0,6153	4,2667
37,5	30	0,089	6	25,6	10,0403	177,3899	0,6222	4,2667
Media						176,9437		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
25,2	30	0,081	6	12	6,1326	108,3491	0,5551	2
25,2	30	0,078	6	12	5,8995	104,2315	0,5340	2
25,2	30	0,079	6	12	6,0074	106,1372	0,5438	2
25,2	30	0,078	6	12	5,9078	104,3772	0,5347	2
Media						105,7738		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
29,9	30	0,099	6	19	8,9120	157,4565	0,6411	3,1667
29,9	30	0,100	6	19	8,9605	158,3132	0,6446	3,1667



UNIVERSIDAD DE CUENCA

29,9	30	0,097	6	19	8,6697	153,1755	0,6237	3,1667
29,9	30	0,097	6	19	8,6875	153,4891	0,6249	3,1667
Media					155,6086			

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
23,2	30	0,089	6	11	6,2211	109,9127	0,5881	1,8333
23,2	30	0,084	6	11	5,8158	102,7520	0,5498	1,8333
23,2	30	0,085	6	11	5,9277	104,7299	0,5604	1,8333
23,2	30	0,088	6	11	6,1245	108,2064	0,5790	1,8333
Media					103,7409			

hc (cm)	bc (cm)	Vel. de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
29	30	0,099	6	20	8,645	152,734	0,606	3,333
29	30	0,099	6	20	8,587	151,712	0,602	3,333
29	30	0,102	6	20	8,844	156,247	0,620	3,333
Media					153,564			

hc (cm)	bc (cm)	Vel. de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
27,2	30	0,089	6	15	7,26	128,311	0,588	2,500
27,2	30	0,088	6	15	7,18	126,869	0,581	2,500
27,2	30	0,087	6	15	7,08	125,066	0,573	2,500
Media					126,749			

• **Abertura 10cm en el modelo**

hc (cm)	bc (cm)	Vel. de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
17,2	30	0,296	10	24,5	15,257	269,554	0,580	2,45
17,2	30	0,300	10	24,5	15,480	273,498	0,588	2,45



UNIVERSIDAD DE CUENCA

17,2	30	0,293	10	24,5	15,111	266,986	0,574	2,45
Media						270,013	0,581	2,45

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
29,8	30	0,133	10	17	11,870	209,714	0,542	1,70
29,8	30	0,139	10	17	12,426	219,549	0,567	1,70
29,8	30	0,139	10	17	12,401	219,104	0,566	1,70
29,8	30	0,138	10	17	12,294	217,217	0,561	1,70
Media						218,623		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
36,1	30	0,141	10	24	15,259	269,589	0,586	2,4
36,1	30	0,140	10	24	15,120	267,141	0,581	2,4
36,1	30	0,143	10	24	15,436	272,713	0,593	2,4
36,1	30	0,142	10	24	15,329	270,830	0,589	2,4
Media						269,187		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
27	30	0,148	10	15	11,988	211,802	0,58	1,5
27	30	0,146	10	15	11,816	208,771	0,57	1,5
27	30	0,147	10	15	11,907	210,371	0,58	1,5
Media						210,3147		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
32	30	0,139	10	20	13,3440	235,7597	0,5614	2
32	30	0,141	10	20	13,5360	239,1519	0,5694	2
32	30	0,130	10	20	12,4392	219,7743	0,5233	2
Media						231,562		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
33,6	30	0,140	10	21,5	14,112	249,329	0,573	2,15
33,6	30	0,137	10	21,5	13,810	243,986	0,560	2,15



33,6	30	0,150	10	21,5	15,130	267,315	0,614	2,15
Media						253,54322		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
35,3	30	0,132	10	23	13,979	246,975	0,548	2,3
35,3	30	0,131	10	23	13,873	245,104	0,544	2,3
35,3	30	0,130	10	23	13,804	243,883	0,542	2,3
Media						245,32095		

• **Abertura 14cm en el modelo**

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
22	30	0,324	14	25,6	21,363	377,441	0,567	1,829
22	30	0,311	14	25,6	20,500	362,191	0,544	1,829
22	30	0,315	14	25,6	20,762	366,822	0,551	1,829
22	30	0,318	14	25,6	20,977	370,614	0,557	1,829
Media						369,267		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
19,5	30	0,324	14	21	18,9355	334,5499	0,5553	1,5
19,5	30	0,308	14	21	17,9888	317,8224	0,5275	1,5
19,5	30	0,315	14	21	18,4500	325,9717	0,5410	1,5
Media						326,1147	0,5413	1,5

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
37,3	30	0,181	14	25,5	20,2290	357,4026	0,5383	1,8214
37,3	30	0,178	14	25,5	19,9495	352,4644	0,5309	1,8214
37,3	30	0,188	14	25,5	21,0108	371,2155	0,5591	1,8214
37,3	30	0,187	14	25,5	20,9029	369,3086	0,5563	1,8214
Media						370,2620	0,5577	1,8214

hc	bc	vel de aforo	a	H	Q Modelo	Q Prototipo	Cd	H/a
----	----	--------------	---	---	----------	-------------	----	-----



(cm)	(cm)	(m/s)	(cm)	cm	L/s	(m3/s)		
35,3	30	0,184	14	23	19,4856	344,2686	0,5460	1,6429
35,3	30	0,188	14	23	19,9092	351,7527	0,5579	1,6429
35,3	30	0,186	14	23	19,6974	348,0106	0,5519	1,6429
Media						348,0106		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
36,8	30	0,188	14	24,5	20,7910	367,3315	0,5645	1,75
36,8	30	0,189	14	24,5	20,8696	368,7202	0,5666	1,75
36,8	30	0,189	14	24,5	20,9091	369,4186	0,5677	1,75
Modelo						368,490086		

hc (cm)	bc (cm)	vel de aforo (m/s)	a (cm)	H cm	Q Modelo L/s	Q Prototipo (m3/s)	Cd	H/a
35,3	30	0,183	14	22,7	19,4312	343,3073	0,5481	1,6214
35,3	30	0,185	14	22,7	19,6111	346,4861	0,5531	1,6214
35,3	30	0,182	14	22,7	19,2545	340,1863	0,5431	1,6214
35,3	30	0,181	14	22,7	19,1501	338,3408	0,5401	1,6214
Modelo						342,0801		

A.2.2 Cálculos para el diseño de perfil Creager

A.2.2.1 Alternativa 2.

$H_o = 7m$

$K = 0,5$

$n = 1,85$

$$\frac{Y}{H_o} = -K \left(\frac{X}{H_o} \right)^n$$

Calculo del perfil	
X	Y
0	0
0,5	-0,0265
1	-0,0956
1,5	-0,2025
2	-0,3448
2,5	-0,5210
3	-0,7300



3,5	-0,9709
4	-1,2429
4,5	-1,5455
5	-1,8782
5,5	-2,2403
5,84	-2,5010

A.2.2.2 Alternativa 3.

Ho = 7m

K= 0,5

n=1,85

$$\frac{Y}{Ho} = -K \left(\frac{X}{Ho} \right)^n$$

Calculo del perfil	
X	Y
0	0
0,5	-0,0265
1	-0,0956
1,5	-0,2025
2	-0,3448
2,5	-0,5210
3	-0,7300
3,5	-0,9709
4	-1,2429
4,5	-1,5455
5	-1,8782
5,5	-2,2403
6	-2,6316
6,5	-3,0516
7	-3,5000
7,5	-3,9765
8	-4,4808
8,5	-5,0126
9	-5,5717
9,5	-6,1578
10	-6,7707
10,5	-7,4103
11	-8,0763
11,5	-8,7685



12	-9,4868
12,35	-10,0002

A.2.2.3 Variante a la alternativa 3.

Ho = 7m

K= 0,5

n=1,85

$$\frac{Y}{Ho} = -K \left(\frac{X}{Ho} \right)^n$$

Calculo del perfil	
X (m)	Y (m)
0	0
0,5	-0,0265
1	-0,0956
1,5	-0,2025
2	-0,3448
2,5	-0,5210
3	-0,7300
3,5	-0,9709
4	-1,2429
4,5	-1,5455
5	-1,8782
5,5	-2,2403
6	-2,6316
6,44	-3,0000
6,5	-3,0516

A.3 Fotografías de los ensayos.

A.3.1 Alternativa 1

- **Máxima carga $H=12,8\text{m}$ Prototipo $25,6\text{cm}$ modelo, $Q=370\text{m}^3/\text{s}$ Prototipo;. Condiciones aguas arriba $Y_2'= 5,5\text{m}$ prototipo , 11cm Modelo**

Resalto débil

Modelo

Prototipo

$L_r = 68\text{cm}$ $L_r=34\text{m}$

$V_f= 0,791\text{m/s}$

$V_f=5,59\text{m/s}$

$Y_1=10\text{cm}$ $Y_1=5\text{m}$

$Y_2=22\text{cm}$ $Y_2=11\text{m}$



- **Máxima carga $H=12,8\text{m}$ Prototipo $25,6\text{cm}$ modelo, $Q=370\text{m}^3/\text{s}$ Prototipo;. Descarga libre.**

Flujo supercrítico

Modelo

Prototipo

$V_f= 1,93\text{m/s}$

$V_f=13,68\text{m/s}$

$Y_3=9\text{cm}$

$Y_3=4,5\text{m}$





A.3.1 Alternativa 2

- **Máxima carga $H=12,8\text{m}$ Prototipo $25,6\text{cm}$ modelo, $Q=370\text{m}^3/\text{s}$ Prototipo;. Descarga libre.**

Flujo supercrítico

Modelo

Prototipo

$V_f = 1,56\text{m/s}$

$V_f = 11,04\text{m/s}$

$Y_3 = 11\text{cm}$

$Y_3 = 5,5\text{m}$





- **Máxima carga H=12,8m Prototipo 25,6cm modelo, Q=370m³/s Prototipo;. Condiciones aguas arriba Y2'= 8,5m**

prototipo
, 17cm
Modelo



Resalto débil

Modelo Prototipo

Lr = 70cm Lr=35m

Vf= 0,95m/s
 Vf=6,75,m/s

Y₁=10cm Y₁=5m

Y₂=18cm Y₂=9m

A.3.2 Alternativa 3

- **Máxima carga H=12,8m Prototipo 25,6cm modelo, Q=370m³/s Prototipo;. Descarga libre.**

Flujo oscilante

Modelo
 Prototipo

Lr = 112cm Lr=56m

Vf= 1,087m/s
 Vf=7,69m/s

Y₁=3,75cm Y₁=7,5m

Y₂=26,5cm Y₂=13,2m



A.3.2 Variante a la Alternativa 3

- **Máxima carga $H=12,8\text{m}$ Prototipo $25,6\text{cm}$ modelo, $Q=370\text{m}^3/\text{s}$ Prototipo;. Descarga libre.**

Flujo oscilante

Modelo

Prototipo

$L_r = 93\text{cm}$ $L_r=46,5\text{m}$

$V_f= 1,07\text{m/s}$

$V_f=7,59\text{m/s}$

$Y_1=4,05\text{cm}$ $Y_1=8,10\text{m}$

$Y_2=22,5\text{cm}$ $Y_2=11,25\text{m}$





UNIVERSIDAD DE CUENCA

A4. Planos de la estructura de captación para el proyecto Hidroeléctrico San Bartolo



UNIVERSIDAD DE CUENCA