



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

CONTROL DEL RESALTO HIDRÁULICO MEDIANTE CUENCOS DISIPADORES

Jorge Giovanni Aguilar Tucubal

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, febrero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

CONTROL DEL RESALTO HIDRÁULICO MEDIANTE CUENCOS DISIPADORES

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JORGE GIOVANNI AGUILAR TUCUBAL

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Wuillian Ricardo Yon Chavarría
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CONTROL DEL RESALTO HIDRÁULICO MEDIANTE CUENCOS DISIPADORES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha marzo de 2013.


Jorge Giovanni Aguilar Tucubal

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 09 de Octubre de 2013

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Jorge Giovanni Aguilar Tucubal, quien se identifica con carné No. 2009-15066, titulado CONTROL DEL RESALTO HIDRÁULICO MEDIANTE CUENCOS DISIPADORES, después de haber hecho las correcciones necesarias lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.

"ID y Enseñad a Todos"


Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
Colegiado No. 6496

LUIS M. SANDOVAL MENDOZA
INGENIERO CIVIL
Colegiado No. 6496



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
15 de enero de 2014

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

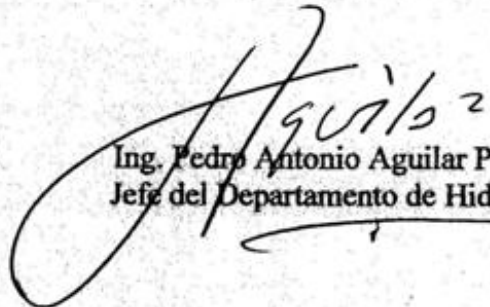
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CONTROL DEL RESALTO HIDRÁULICO MEDIANTE CUENCOS DISIPADORES**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Jorge Giovanni Aguilar Tucubal, quien contó con la asesoría del Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

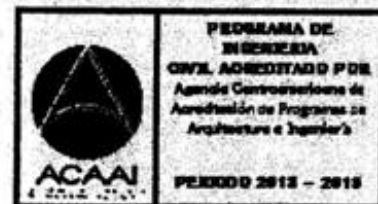

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Jorge Giovanni Aguilar Tucubal, titulado **CONTROL DEL RESALTO HIDRÁULICO MEDIANTE CUENCOS DISIPADORES**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, febrero de 2014.

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala

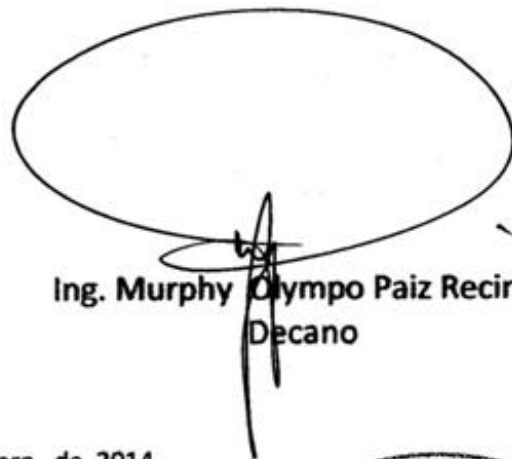


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 045.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **CONTROL DEL RESALTO HIDRÁULICO MEDIANTE CUENCOS DISIPADORES**, presentado por el estudiante universitario **Jorge Giovanni Aguilar Tucubal**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 4 de febrero de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Jorge Aguilar y Violeta Tucubal.

Por su apoyo incondicional, porque creyeron en mí en todo momento, por su amor, comprensión, consejos y buenas enseñanzas. Sin la ayuda de ustedes esto no sería posible.

Mis hermanos

Por estar conmigo en los momentos de alegría y en esos momentos difíciles de mi carrera, por el apoyo, comprensión y ser un ejemplo a seguir para mí.

Mi novia

Por ese amor, estar conmigo en las buenas y malas, el apoyo que siempre me has dado, creer en mí, por todo eso y más, gracias.

Mi familia en general

Por compartir los momentos felices de mi vida y el apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por las bendiciones de cada día y llenarme de sabiduría en todo momento.
- Toda mi familia** Por sus consejos y apoyo en todo momento.
- Universidad de San Carlos de Guatemala** En especial a la Facultad de Ingeniería. Por las enseñanzas personales, las académicas de cada catedrático y por forjar mi futuro como profesional.
- Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza** Por su amistad, por el apoyo que me brindó al asesorarme en mi trabajo de graduación y ayudarme a alcanzar esta meta.
- Mis amigos** Por ser un gran aporte en estos años de estudio, su sincera amistad y los ánimos de siempre seguir adelante.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. RESALTO HIDRÁULICO	1
1.1. Definición	1
1.2. Resalto en canales rectangulares	7
1.3. Tipos de resalto	7
1.4. Estabilidad del resalto	9
1.5. Características básicas del resalto	12
1.5.1. Pérdida de energía	13
1.5.2. Eficiencia	14
1.5.3. Altura del resalto	15
1.5.4. Longitud del resalto	15
1.5.5. Perfil superficial	17
1.5.6. Localización del resalto	19
2. USOS Y APLICACIONES DEL RESALTO HIDRÁULICO	21
2.1. Aplicaciones prácticas del resalto	21
2.1.1. El resalto como disipador de energía	24
2.1.1.1. Posición del resalto	25
2.1.1.2. Condiciones de salida	27

	2.1.1.3.	Tipos de resalto	29
2.2.		Control del resalto mediante obstáculos.....	30
2.3.		Control del resalto mediante una caída abrupta	31
2.4.		Cuencos disipadores.....	32
	2.4.1.	Cuenco disipador SAF.....	34
	2.4.2.	Cuenco disipador USBR II.....	38
	2.4.3.	Cuenco disipador USBR III.....	43
	2.4.4.	Cuenco disipador USBR IV	47
3.		ENSAYOS DE LABORATORIO CON CUENCOS DISIPADORES	49
3.1.		Diseño y construcción de cuencos disipadores	49
	3.1.1.	Construcción de rápidas o rampas	51
		3.1.1.1. Rápida con pendiente 2:1	51
		3.1.1.2. Rápida con pendiente 0.9:1	55
	3.1.2.	Diseño, dimensionamiento y construcción de cuenco SAF	58
		3.1.2.1. Longitud del cuenco.....	58
		3.1.2.2. Bloques de rápida.....	59
		3.1.2.3. Bloques de piso	61
		3.1.2.4. Umbral de salida.....	63
	3.1.3.	Diseño, dimensionamiento y construcción de cuenco USBR II.....	67
		3.1.3.1. Longitud del cuenco.....	67
		3.1.3.2. Bloques de rápida.....	68
		3.1.3.3. Umbral dentado de salida	70
	3.1.4.	Diseño, dimensionamiento y construcción de cuenco USBR III	75
		3.1.4.1. Longitud del cuenco.....	75
		3.1.4.2. Bloques de rápida.....	76

	3.1.4.3.	Bloques de piso.....	78
	3.1.4.4.	Umbral de salida	80
3.2.		Ensayos para la formación y control del resalto hidráulico mediante cuencos disipadores	84
	3.2.1.	Ensayos de laboratorio para cuenco SAF	85
	3.2.1.1.	Obtención de resultados	88
	3.2.1.2.	Longitudes de resaltos sin cuenco SAF	90
	3.2.1.3.	Comparación de resultados.....	92
	3.2.2.	Ensayos de laboratorio para cuenco USBR II	92
	3.2.2.1.	Obtención de resultados	96
	3.2.2.2.	Longitudes de resaltos sin cuenco USBR II.....	101
	3.2.2.3.	Comparación de resultados.....	102
	3.2.3.	Ensayos de laboratorio para cuenco USBR III	103
	3.2.3.1.	Obtención de resultados	107
	3.2.3.2.	Longitudes de resaltos sin cuenco USBR III.....	112
	3.2.3.3.	Comparación de resultados.....	113
		CONCLUSIONES	115
		RECOMENDACIONES.....	117
		BIBLIOGRAFÍA.....	119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Resalto hidráulico.....	2
2.	Volumen de control.....	2
3.	Tipos de resalto.....	9
4.	Estabilidad del resalto hidráulico.....	10
5.	$E2 > E_n$: resalto barrido.....	11
6.	$E2 = E_n$: resalto claro.....	11
7.	$E2 < E_n$: resalto ahogado.....	12
8.	Longitud en términos de la profundidad y_2	16
9.	Perfiles superficiales de resaltos hidráulicos en base a F_1	18
10.	Localización de un resalto hidráulico.....	19
11.	Resalto hidráulico formado en diferentes estructuras hidráulicas.....	22
12.	Recuperación del tirante aguas abajo del resalto hidráulico.....	23
13.	Resalto hidráulico ahogado bajo una compuerta.....	23
14.	Turbulencia en el resalto hidráulico.....	23
15.	Efecto de la profundidad de salida en la formación de un resalto aguas abajo de un vertedero o por debajo de una compuerta deslizante.....	25
16.	Clasificación de las condiciones de salida para el diseño de obras de protección contra la socavación.....	27
17.	Regiones de la profundidad de aguas debajo de una caída.....	32
18.	Dimensiones del cuenco SAF.....	37

19.	Curvas de diseño y dimensiones del cuenco USBR II. (a) definición de símbolos; (b) profundidades de salida mínima; (c) longitud del resalto hidráulico; (d) superficie del agua y perfiles de flujo aproximados; (e) dimensiones recomendadas.....	41
20.	Curvas de diseño y dimensiones del cuenco USBR III. (a) dimensiones recomendadas; (b) longitud del resalto hidráulico; (c) altura de bloques de rápida y bloques de piso.....	45
21.	Dimensiones del cuenco USBR IV	48
22.	Canal hidrodinámico.....	49
23.	Sección de canal.....	50
24.	Método de aforo en el canal.....	51
25.	Rápida con pendiente 2:1.....	52
26.	Ensayo de rápida con pendiente 2:1.....	52
27.	Rápida acotada con pendiente 2:1.....	53
28.	Ensayo de rápida con pendiente 0.9:1.....	55
29.	Rápida acotada con pendiente 0.9:1.....	56
30.	Bloques de rápida de cuenco SAF.....	60
31.	Bloques de piso de cuenco SAF.....	62
32.	Umbral de salida de cuenco SAF.....	64
33.	Dimensiones de cuenco SAF.....	65
34.	Modelo construido de cuenco SAF.....	66
35.	Bloques de rápida de cuenco USBR II.....	70
36.	Umbral dentado de salida de cuenco USBR II.....	72
37.	Dimensiones de cuenco USBR II.....	73
38.	Modelo construido de cuenco USBR II.....	74
39.	Bloques de rápida de cuenco USBR III.....	77
40.	Bloques de piso de cuenco USBR III.....	79
41.	Umbral de salida de cuenco USBR III.....	81
42.	Dimensiones de cuenco USBR III.....	82

43.	Modelo construido de cuenco USBR III	83
44.	Cuenco SAF instalado en canal del laboratorio	85
45.	Ensayos de laboratorio de cuenco SAF	86
46.	Resalto oscilante de cuenco SAF	90
47.	Cuenco USBR II instalado en canal del laboratorio	93
48.	Ensayos de laboratorio de cuenco USBR II	93
49.	Resalto estable de cuenco USBR II	98
50.	Turbulencia en el resalto de cuenco USBR II	99
51.	Cuenco USBR III instalado en canal del laboratorio	104
52.	Ensayos de laboratorio de cuenco USBR III	104
53.	Resalto estable de cuenco USBR III	109
54.	Turbulencia en el resalto de cuenco USBR III	110
55.	Gráfica de resultados obtenidos L/y_2 vrs. F_1	114

TABLAS

I.	Valores de A según el talud z	17
II.	Resultados obtenidos en ensayo de rampa con pendiente 2:1	53
III.	Número de Froude inicial para rampa con pendiente 2:1	54
IV.	Resultados obtenidos en ensayo de rampa con pendiente 0.9:1	56
V.	Número de Froude inicial para rampa con pendiente 0.9:1	57
VI.	Caudales obtenidos en ensayos de laboratorio de cuenco SAF	88
VII.	Datos medidos en ensayos de laboratorio de cuenco SAF	88
VIII.	Número de Froude inicial para cuenco SAF	89
IX.	Porcentaje de reducción de longitud del resalto para cuenco SAF	92
X.	Caudales obtenidos en ensayos de laboratorio de cuenco USBR II	96
XI.	Datos medidos en ensayos de laboratorio de cuenco USBR II	96

XII.	Número de Froude inicial para cuenco USBR II.....	97
XIII.	Porcentaje de reducción de longitud del resalto para cuenco USBR II.....	102
XIV.	Caudales obtenidos en ensayos de laboratorio de cuenco USBR III.....	107
XV.	Datos medidos en ensayos de laboratorio de cuenco USBR III.....	107
XVI.	Número de Froude inicial para cuenco USBR III.....	108
XVII.	Porcentaje de reducción de longitud del resalto para cuenco USBR III.....	113

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Aceleración de la gravedad
h₃	Altura de bloques de piso para cuenco USBR III
h₁	Altura de bloques de rápida para cuencos USBR
h₂	Altura de umbral de salida para cuenco USBR II
h₄	Altura de umbral de salida para cuenco USBR III
H₀	Altura del flujo sobre la cresta de la rápida
c	Altura del umbral de salida de cuenco SAF
w₃	Ancho de bloques de piso para cuenco USBR III
w₁	Ancho de bloques de rápida para cuencos USBR
w₂	Ancho de bloques de umbral dentado de salida para cuenco USBR II
B	Ancho del canal
n₂	Ancho y espaciamiento de bloques de piso para cuenco SAF
n₁	Ancho y espaciamiento de bloques de rápida para cuenco SAF
A	Área
Q	Caudal
cm	Centímetro
Δh	Diferencia entre las profundidades después y antes del resalto hidráulico
E_n	Energía específica aguas abajo donde ya está establecido cierto régimen, es decir, después de E ₂

E₁	Energía específica antes del resalto hidráulico
E₂	Energía específica después del resalto hidráulico
s₃	Espaciamiento entre bloques de piso para cuenco USBR III
s₁	Espaciamiento entre bloques de rápida para cuencos USBR
s₂	Espaciamiento entre bloques de umbral dentado de salida para cuenco USBR II
l	Litro
L_B	Longitud del cuenco SAF
L_{II}	Longitud del cuenco USBR II
L_{III}	Longitud del cuenco USBR III
L	Longitud del resalto hidráulico
F₁	Número de Froude inicial
y₁	Profundidad de agua antes del resalto hidráulico
y₂	Profundidad de agua después del resalto hidráulico
y'₂	Profundidad de salida aguas abajo
s	Segundo
t	Tiempo
v₁	Velocidad antes del resalto hidráulico
v₂	Velocidad después del resalto hidráulico
V	Volumen

GLOSARIO

Aforar	Es medir el volumen de agua de una corriente en determinado tiempo.
Aguas abajo	Se usa para referirse a un punto situado después de la sección considerada, avanzando en el sentido de la corriente.
Aguas arriba	Se usa para referirse a un punto situado antes de la sección considerada, avanzando en el sentido de la corriente.
Canal	Son conductos en los que circula agua debido a la acción de la gravedad y sin ninguna presión, ya que la superficie libre del agua está en contacto con la atmósfera.
Caudal	Es la cantidad de fluido que pasa por unidad de tiempo en una sección determinada.
Cuencos disipadores	Son obras hidráulicas diseñadas para mejorar el comportamiento del resalto hidráulico, aumentando su factor de seguridad y reduciendo la longitud del mismo.
Flujo	Es el movimiento de un fluido.

Número de Froude	Es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y la fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido.
Rápida	Es una sección de canal con pendiente muy pronunciada.
Resalto hidráulico	Es el fenómeno en el cual una corriente líquida de gran velocidad en flujo supercrítico, bajo ciertas condiciones, pasa a un flujo subcrítico con una brusca elevación de la superficie libre y una pérdida de energía considerable.
SAF	(San Anthony Falls, por sus siglas en inglés). Es un laboratorio de hidráulica en la Universidad de Minnesota, EE. UU.
Socavación	Es el resultado de la acción erosiva del flujo de agua que arranca y acarrea material del lecho.
Tirante	Es la distancia vertical del punto más bajo de la sección del canal a la superficie libre.
USBR	(United States Bureau of Reclamation, por sus siglas en inglés). Es una agencia federal de los EE.UU., que supervisa la gestión de los recursos hídricos, específicamente el riego, abastecimiento de agua y la generación de energía hidroeléctrica.

RESUMEN

Al ser la hidráulica una de las ramas de aplicación para el ingeniero civil, es importante conocer obras que permitan el funcionamiento y mejoramiento de los fenómenos naturales de dicha rama, como es el resalto hidráulico.

En el presente trabajo de investigación se detallan el diseño y construcción de cuencos disipadores de energía, específicamente los cuencos SAF, USBR II y USBR III. Que son un tipo de obra hidráulica utilizados para el control y mejoramiento del comportamiento del resalto hidráulico, haciendo de éste un resalto más seguro, con menos longitud y por consiguiente de menos costo a la hora de llevar a cabo la construcción de la obra. Se calculan las dimensiones con base en reglas de diseño consultadas en diferentes bibliografías, variando dichas dimensiones como lo son el caudal, tirantes y dimensiones de canal. Cabe mencionar que éstos son solo modelos que se utilizan para el estudio del comportamiento del resalto, para luego ser aplicados de forma real donde se le necesite.

El comportamiento del resalto va a variar según el cuenco utilizado, necesitando ciertas condiciones que deben cumplir con las normas de diseño para la implementación de cada cuenco. Esto quiere decir que el tipo de cuenco a utilizar va a depender de las condiciones del flujo.

Al final se hace una comparación de longitudes del resalto con y sin cuenco, determinando si los resultados se asemejan con las especificaciones de los distintos investigadores.

OBJETIVOS

General

Estudiar el comportamiento del resalto hidráulico mediante la construcción de 3 modelos de cuencos disipadores (SAF, USBR II y USBR III), especificando cada una de sus características y diferencias.

Específicos

1. Construir modelos a escala de los diferentes cuencos disipadores para observar el comportamiento del resalto hidráulico en el laboratorio.
2. Comparar resultados obtenidos de la realización de los ensayos con la teoría, aplicando fórmulas y los criterios de diseño en la construcción de los modelos.
3. Conocer las características del resalto hidráulico y cómo es que influye la aplicación de cuencos disipadores en su comportamiento, dependiendo del tipo de modelo que sea.
4. Establecer criterios para la utilización de cada uno de los cuencos disipadores, según sea el requerimiento.

INTRODUCCIÓN

Al referirse a proyectos relacionados con el flujo de agua en canales abiertos se está tratando con un elemento que es vital para la vida del ser humano. Por consiguiente el estudio de las leyes que rigen el flujo de agua en canales abiertos es importante y uno de los fenómenos que debe analizarse es el resalto hidráulico. El resalto hidráulico funciona como un dissipador de energía natural, previene la socavación aguas abajo y airea el agua en sistemas de suministros, entre otras funciones que tiene.

Es un fenómeno caracterizado por un cambio brusco de tirantes y velocidad del cauce, el cual puede ser formado de varias maneras y una de ellas es con la utilización de cuencos dissipadores, que son un tipo de obras hidráulicas, dichos cuencos están formados por varias partes que tienen como función controlar y formar el resalto hidráulico.

Con la construcción y diseño de 3 tipos de modelos de cuencos dissipadores como lo son el SAF (San Anthony Falls, por sus siglas en inglés), el USBR II (United States Bureau of Reclamation, por sus siglas en inglés) y el USBR III, se pretende estudiar el comportamiento que tendrá el resalto hidráulico y las variaciones que éste sufrirá según el tipo de modelo que se utilice, específicamente en el porcentaje de reducción de la longitud del resalto, esto para fines de investigación, con la comprobación de la teoría y la práctica.

En el capítulo I se definen todas las características del resalto hidráulico. En el capítulo II se detallan los usos y aplicaciones del resalto hidráulico. El capítulo III trata sobre el diseño y construcción de los cuencos dissipadores y

sobre los ensayos de laboratorio con los mismos. Y al final se presentan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

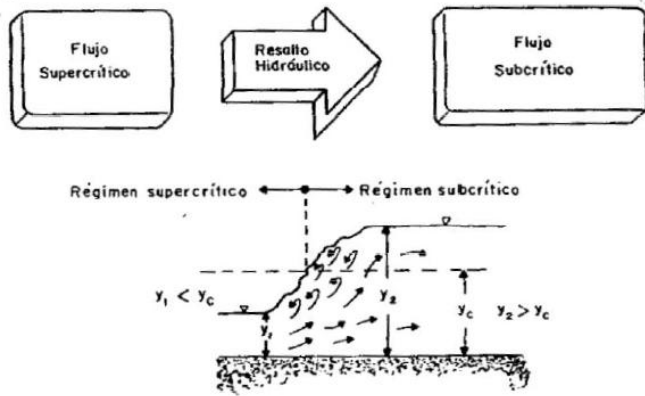
1. RESALTO HIDRÁULICO

1.1. Definición

El resalto o salto hidráulico es un fenómeno local, que se presenta en un flujo rápidamente variado, el cual siempre va acompañado por un aumento súbito del tirante y una pérdida de energía bastante considerable en un tramo relativamente corto. El cambio de régimen lento (subcrítico) a rápido (supercrítico) se realiza de forma progresiva y ordenada, todo lo contrario al paso inverso, es decir, de régimen rápido a lento, el cual se produce siempre de modo brusco, con un frente de onda de gran agitación.

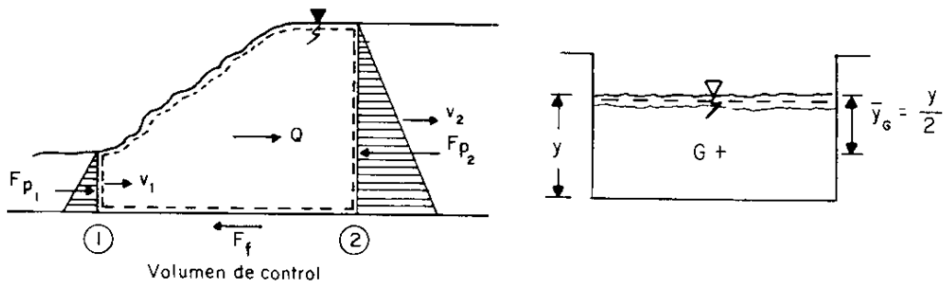
Generalmente, el resalto se forma cuando en una corriente rápida existe algún tipo de obstáculo o mediante una caída abrupta. Esto sucede al pie de las estructuras hidráulicas tales como vertederos, salidas de compuertas y cuencos disipadores de energía. El control del resalto mediante obstáculos es útil si la profundidad de aguas abajo es menor que la profundidad secuente para un resalto normal, pero si la primera es mayor que la segunda, debe utilizarse una caída abrupta en el piso del canal para asegurar el resalto. Por lo general esta condición ocurre a la salida de una expansión con flujo supercrítico.

Figura 1. **Resalto hidráulico**



Fuente: SANDOVAL, Luis. Manual de resalto hidráulico. p. 1.

Figura 2. **Volumen de control**



Fuente: VILLÓN B., Máximo. Hidráulica de canales. p. 190.

Se puede deducir la relación entre los tirantes que se presentan antes y después del resalto aplicando la ecuación de la cantidad de movimiento o *momentum*:

$$\rho Q(v_2 - v_1) = F_{P_1} - F_{P_2} \quad \text{EC. 1}$$

Sustituyendo en EC. 1 el valor de $v = Q/A$, obtenido de la ecuación de la continuidad, se tiene:

$$\begin{aligned}\rho Q \left[\frac{Q}{A_2} - \frac{Q}{A_1} \right] &= F_{P_1} - F_{P_2} \\ \rho Q^2 \left[\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right] &= F_{P_1} - F_{P_2}\end{aligned}\quad \text{EC. 2}$$

Los empujes totales debidos a la presión hidrostática se pueden calcular con la ecuación de la fuerza hidrostática:

$$\begin{aligned}F_{P_1} &= \gamma \bar{y}_{G1} A_1 \\ F_{P_2} &= \gamma \bar{y}_{G2} A_2\end{aligned}$$

Sustituyendo $\gamma = \rho g$; e $\bar{y}_G = y/2$ (de la figura 2) y $A = yb$ para un canal rectangular, se tiene:

$$\begin{aligned}F_{P_1} &= \rho g \times \frac{y_1}{2} \times y_1 b \\ F_{P_2} &= \rho g \times \frac{y_2}{2} \times y_2 b\end{aligned}\quad \text{EC. 3}$$

De EC. 1 para el cálculo del momento, se tiene:

$$F_P + \rho Qv \rightarrow \text{Momento}$$

Sustituyendo de EC. 2 y EC. 3, se tiene:

$$\left(\rho g \times \frac{y}{2} \times yb\right) + \left(\frac{\rho Q^2}{A}\right)$$

Simplificando y sustituyendo $A = by$, para un canal rectangular, queda así:

$$\rho gb \frac{y^2}{2} + \frac{\rho Q^2}{by} \quad \text{EC. 4}$$

Por conservación del momento:

$$M_1 = M_2$$

Sustituyendo de EC. 4, se tiene:

$$\rho gb \frac{y_1^2}{2} + \frac{\rho Q^2}{by_1} = \rho gb \frac{y_2^2}{2} + \frac{\rho Q^2}{by_2}$$

Se cancelan las densidades y dividiendo cada término entre la gravedad:

$$b \frac{y_1^2}{2} + \frac{Q^2}{gby_1} = b \frac{y_2^2}{2} + \frac{Q^2}{gby_2}$$

Simplificando, se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{b}{2}(y_1^2 - y_2^2) &= \frac{Q^2}{gb} \left(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right) \\ \frac{b}{2}[(y_1 - y_2)(y_1 + y_2)] &= \frac{Q^2}{gb} \left(\frac{y_1 - y_2}{y_1 y_2} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{y_1+y_2}{2} = \frac{Q^2}{gb^2} \left(\frac{1}{y_1 y_2} \right) \quad \text{EC. 5}$$

$$\frac{Q^2}{gb^2} = y_1 \times y_2 \frac{(y_1+y_2)}{2} \quad \text{EC. 6}$$

Sustituyendo $Q/b = q$ (caudal unitario para un canal rectangular) en EC. 5 y simplificando, se tiene:

$$y_1 + y_2 - \frac{2q^2}{gy_1 y_2} = 0$$

Multiplicando por y_2 , se tiene:

$$y_1 y_2 + y_2^2 - \frac{2q^2}{gy_1} = 0$$

Aplicando la fórmula para hallar las raíces de la ecuación de segundo grado se obtiene:

$$y_2 = \frac{-y_1 \pm \sqrt{y_1^2 + \frac{8q^2}{gy_1}}}{2}$$

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} \pm \sqrt{\frac{2q^2}{gy_1} + \frac{y_1^2}{4}}$$

Tomando en signo (+), para que y_2 resulte positivo, se tiene:

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{2q^2}{gy_1} + \frac{y_1^2}{4}}$$

Ecuación que permite calcular el tirante conjugado mayor en un canal de sección rectangular, conocido el menor y el caudal por unidad de ancho.

Colocando la ecuación anterior en términos de la velocidad, ya que $q_1 = v_1 y_1$, se tiene:

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{2v_1^2 y_1^2}{gy_1} + \frac{y_1^2}{4}} \quad \text{EC. 7}$$

Para el cálculo del número de Froude, se tiene:

$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}} \quad \text{EC. 8}$$

Elevando ambos lados al cuadrado, se tiene:

$$F_1^2 = \frac{v_1^2}{gy_1}$$

Sustituyendo este valor en EC. 7, resulta:

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{2F_1^2 y_1^2 + \frac{y_1^2}{4}}$$

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{y_1^2}{4}(8F_1^2 + 1)}$$

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \frac{y_1}{2}\sqrt{8F_1^2 + 1}$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1\right) \quad \text{EC. 9}$$

Ecuación que permite calcular el tirante conjugado mayor en un canal de sección rectangular, conocido el menor y el número de Froude antes del resalto.

1.2. Resalto en canales rectangulares

Para un flujo rápido (supercrítico) en un canal rectangular horizontal, la energía del flujo se disipa progresivamente a través de la resistencia causada por la fricción a lo largo de las paredes y fondo del canal, resultando una disminución de la velocidad y un aumento de la profundidad en la dirección del flujo. Un resalto hidráulico se formará en el canal si el número de Froude F_1 del flujo, la profundidad y_1 y la profundidad aguas abajo y_2 satisfacen la ecuación 9.

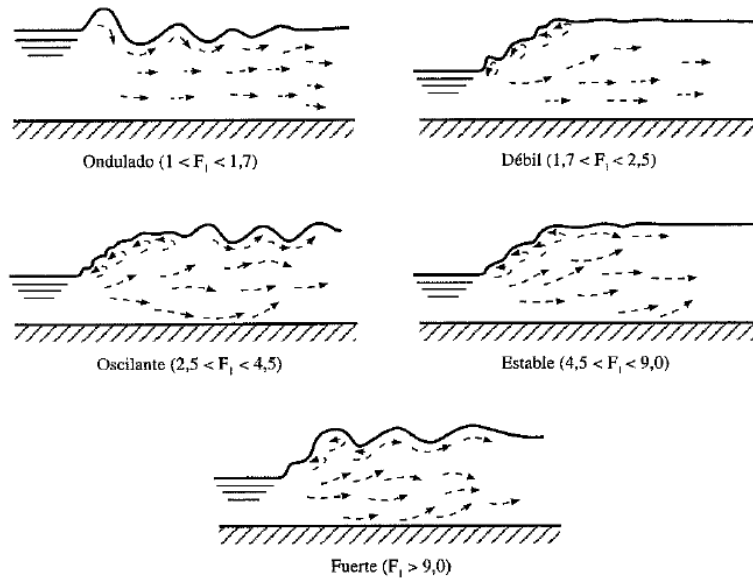
1.3. Tipos de resalto

La forma del resalto hidráulico va a depender del número de Froude del flujo aguas arriba del resalto (F_1). De acuerdo con los estudios realizados por el U S Bureau of Reclamation sobre el resalto hidráulico, se clasifican de la siguiente manera:

- Para F_1 igual a 1, el flujo es crítico y por consiguiente no se forma resalto.

- Si F_1 se encuentra entre 1 y 1,7, se presenta el resalto ondulado.
- Si F_1 se encuentra entre 1,7 y 2,5, se desarrollan una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero a la vez la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme. Se designa por la etapa previa al resalto, sin turbulencia activa y con pérdida de energía baja. Se presenta entonces el resalto débil.
- Si F_1 se encuentra entre 2,5 y 4,5, existe entonces un chorro que oscila y entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. No se forma un resalto propiamente dicho, y se dice que se tiene un régimen de transición, en el que las oscilaciones producen grandes ondas con período irregular que pueden extenderse a lo largo de varios kilómetros y causar daños. Se presenta entonces el resalto oscilante.
- Si F_1 se encuentra entre 4,5 y 9,0, la extremidad aguas abajo del remolino de la superficie y el punto en el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurre prácticamente en la misma sección vertical. La acción y posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad aguas abajo. El resalto está bien balanceado y el rendimiento en la disipación de energía es el mejor, variando entre el 45 y el 70 por ciento. Se presenta entonces el resalto estable.
- Si F_1 es igual a 9,0 o mayor, el chorro de alta velocidad produce golpes intermitentes de agua rodando hacia abajo, generando ondas aguas abajo, y puede prevalecer una superficie rugosa. La efectividad de disipación de energía del resalto puede alcanzar un 85 por ciento. Se presenta entonces el resalto fuerte.

Figura 3. Tipos de resalto



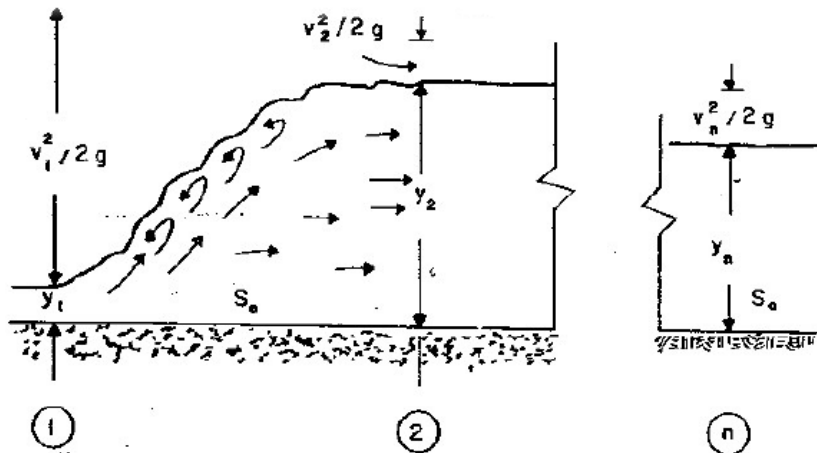
Fuente: LÓPEZ, Lázaro. Manual de hidráulica. p. 394.

1.4. Estabilidad del resalto

El resalto hidráulico generalmente es utilizado como un disipador natural de energía, por eso es muy importante cuidar la estabilidad y la formación del mismo.

De manera general se puede decir que el resalto se formará dependiendo de la energía que tenga en una sección aguas abajo, inmediatamente del mismo donde se encuentre ya establecido determinado régimen, lo cual inducirá la formación del tipo de resalto que se forme. Lo anterior se puede observar con mayor claridad en la figura 4.

Figura 4. Estabilidad del resalto hidráulico



Fuente: SANDOVAL, Luis. Manual de resalto hidráulico. p. 6.

En la figura se pueden marcar 3 secciones bien definidas:

Sección 1: marca esquemáticamente el comienzo del resalto y de las tres secciones indicadas es la que tiene mayor energía específica.

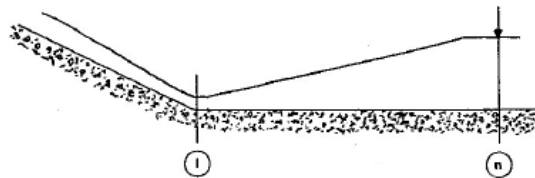
Sección 2: marca el final del resalto y su energía específica es ligeramente menor que la que hay en la sección 1, esto debido a las fuertes pérdidas de energía durante el resalto.

Sección n: marca la sección inmediata a la formación del resalto en el que ya se encuentra establecido un cierto tipo de régimen.

Lo que determina el lugar de la formación del resalto y la estabilidad del mismo es la comparación entre las energías que se tengan en las secciones 2 y n, se pueden presentar tres casos:

- $E_2 > E_n$: en este caso puede pensarse fácilmente que para que no existan discontinuidades en las energías a lo largo del canal, el resalto tendrá que ser barrido, esto último le dará oportunidad al flujo de perder más energía y así equiparar la que se tenga en n.

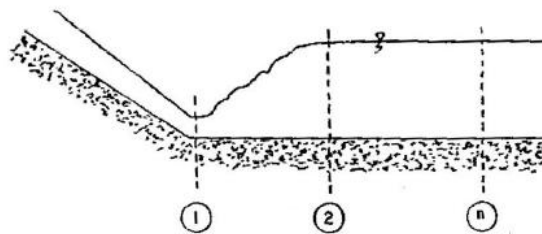
Figura 5. **$E_2 > E_n$: resalto barrido**



Fuente: SANDOVAL, Luis. Manual de resalto hidráulico. p. 7.

- $E_2 = E_n$: es el caso más conveniente y el más estable, ya que se genera el resalto justamente en el lugar deseado (al pie de la estructura o del canal de llegada); sucede que las pérdidas efectuadas en el resalto son exactamente las deseadas para igualar la energía en n y el flujo no precisa barrerse para perder más energía. Por lo anterior, se deduce fácilmente que el resalto será claro.

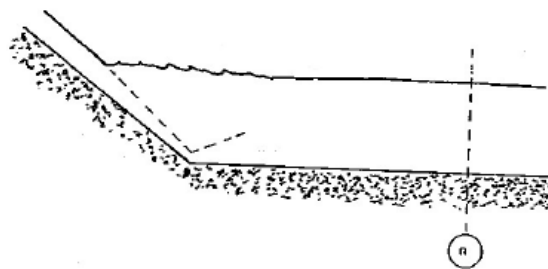
Figura 6. **$E_2 = E_n$: resalto claro**



Fuente: SANDOVAL, Luis. Manual de resalto hidráulico. p. 7.

- $E_2 < E_n$: en este caso la energía que se tiene en la sección n, por ser mayor que la energía remanente del resalto en 2, y por estar determinada la energía de la sección en su mayor parte por la altura de presión (tirante) se presentará un resalto ahogado.

Figura 7. **$E_2 < E_n$: resalto ahogado**



Fuente: SANDOVAL, Luis. Manual de resalto hidráulico. p. 7.

1.5. Características básicas del resalto

A continuación se presentan varias características básicas del resalto hidráulico en canales rectangulares horizontales, las cuales se definen y se detallan con su respectiva ecuación para entenderlo de una mejor manera:

- Pérdida de energía
- Eficiencia
- Altura del resalto
- Longitud del resalto
- Perfil superficial
- Localización del resalto

1.5.1. Pérdida de energía

La pérdida de energía en el resalto hidráulico es igual a la diferencia que existe entre las energías específicas antes y después del resalto. Puede demostrarse que la pérdida es:

$$\Delta E = E_1 - E_2$$
$$\Delta E = \left(y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

Sabiendo que $v = Q/A$ y que $A = by$, para una sección rectangular, se tiene:

$$\Delta E = y_1 + \frac{Q^2}{2gb^2y_1^2} - y_2 - \frac{Q^2}{2gb^2y_2^2}$$
$$\Delta E = (y_1 - y_2) + \left(\frac{Q^2}{2gb^2y_1^2} - \frac{Q^2}{2gb^2y_2^2} \right)$$
$$\Delta E = (y_1 - y_2) + \frac{Q^2}{2gb^2} \left[\frac{y_2^2 - y_1^2}{y_1^2y_2^2} \right]$$

Buscando la EC. 6 y sustituyendo, se tiene:

$$\Delta E = (y_1 - y_2) + \frac{y_1 \times y_2 (y_1 + y_2)}{4} \left[\frac{y_2^2 - y_1^2}{y_1^2y_2^2} \right]$$
$$\Delta E = \frac{4y_1y_2(y_1 - y_2) + (y_1 + y_2)(y_2^2 - y_1^2)}{4y_1y_2}$$
$$\Delta E = \frac{4y_1^2y_2 - 4y_1y_2^2 + (y_1y_2^2 - y_1^3 + y_2^3 - y_1^2y_2)}{4y_1y_2}$$

$$\Delta E = \frac{3y_1^2 y_2 - 3y_1 y_2^2 - y_1^3 + y_2^3}{4y_1 y_2}$$

$$\Delta E = \frac{y_2^3 - 3y_1 y_2^2 + 3y_1^2 y_2 - y_1^3}{4y_1 y_2}$$

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad \text{EC. 10}$$

Donde:

E_1 = energía específica antes del resalto

E_2 = energía específica después del resalto

y_1 = profundidad del agua antes del resalto

y_2 = profundidad del agua después del resalto

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

1.5.2. Eficiencia

La eficiencia del resalto es la relación que existe entre las energías específicas tanto antes como después del resalto. Se puede demostrar que la eficiencia del resalto es:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad \text{EC. 11}$$

La ecuación 11 indica que la eficiencia de un resalto es adimensional y que depende solamente del número de Froude del flujo aguas arriba del resalto (F_1). La pérdida relativa es igual a $1 - E_1/E_2$; ésta también es una función adimensional de F_1 .

1.5.3. Altura del resalto

La diferencia entre las profundidades después y antes del resalto es llamada la altura del resalto, o $\Delta h = y_2 - y_1$. Al expresar cada término en relación a la energía específica inicial:

$$\frac{\Delta h}{E_1} = \frac{y_2}{E_1} - \frac{y_1}{E_1} \quad \text{EC. 12}$$

Donde $\Delta h/E_1$ es la altura relativa, y_1/E_1 es la profundidad inicial relativa, y y_2/E_1 es la profundidad seciente relativa. Se puede demostrar que estas relaciones son funciones adimensionales de F_1 , pudiendo expresar la altura relativa así:

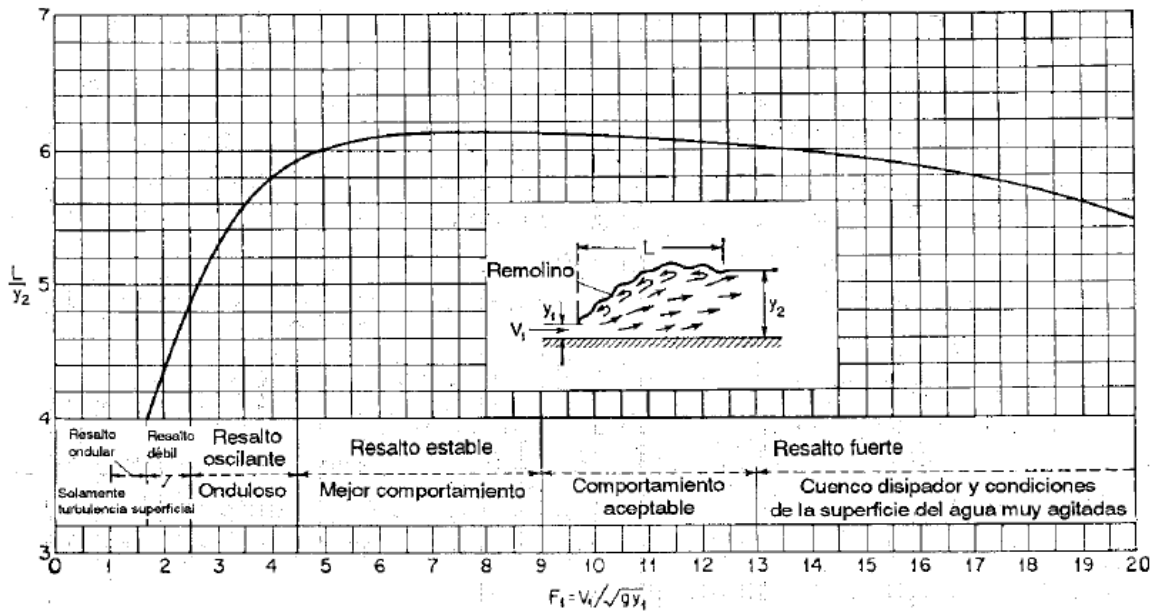
$$\frac{\Delta h}{E_1} = \frac{\sqrt{1+8F_1^2-3}}{F_1^2+2} \quad \text{EC. 13}$$

1.5.4. Longitud del resalto

La longitud del resalto se puede definir como la distancia medida desde la cara frontal del resalto hasta la sección inmediatamente aguas abajo en que termina la zona turbulenta. En teoría, la longitud del resalto no puede determinarse con facilidad y exactitud. Ha sido investigada experimentalmente por muchos ingenieros y hasta ahora no se ha desarrollado un procedimiento satisfactorio para su cálculo. Esto se debe a que el problema no ha sido analizado teóricamente, así como a las complicaciones prácticas derivadas de la inestabilidad general del fenómeno y la dificultad en definir las secciones de inicio y fin del resalto.

Según las investigaciones del U S Bureau of Reclamation, la longitud del resalto en un canal rectangular horizontal varía de acuerdo a la figura 8:

Figura 8. Longitud en términos de la profundidad y_2



Fuente: CHOW, Ven T. Hidráulica de canales abiertos. p. 390.

Para un canal trapezoidal la longitud del resalto es mayor debido a la simetría que se produce por la distribución no uniforme de las velocidades. Según Sieñchin la longitud se calcula así:

$$L = A(y_2 - y_1) \quad \text{EC. 14}$$

Donde A depende del talud z del canal, según la siguiente tabla:

Tabla I. **Valores de A según el talud z**

Talud Z	0	0,5	0,75	1	1,25	1,5
A	5	7,9	9,2	10,6	12,6	15

Fuente: SANDOVAL, Luis. Manual de resalto hidráulico. p. 3.

Según Hsing, para un canal trapezoidal la longitud del resalto es mucho mayor, de acuerdo con la siguiente fórmula:

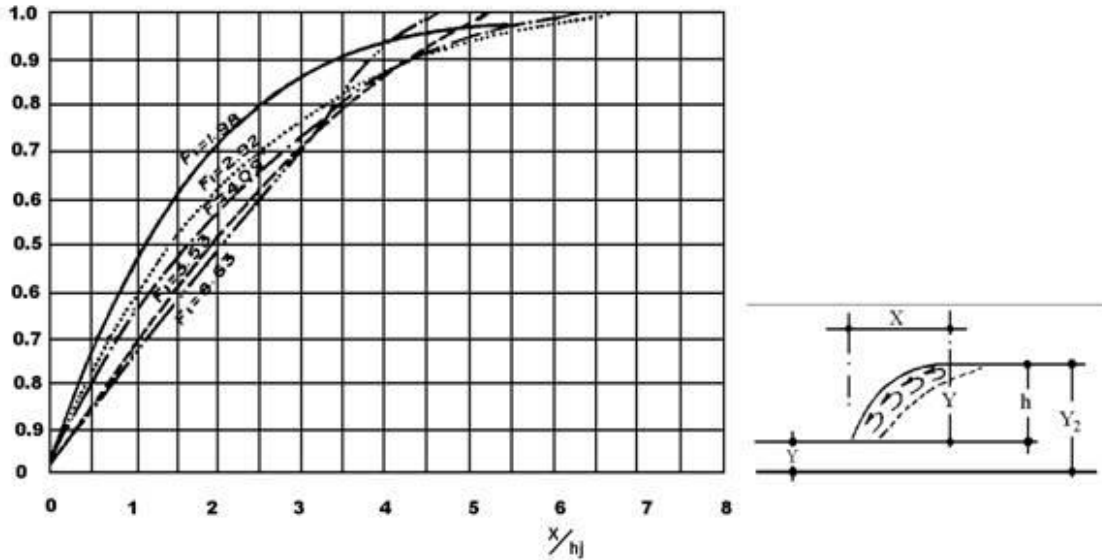
$$L = 5y_2 \left(1 + 4 \sqrt{\frac{(y_2 - y_1)}{y_1}} \right) \quad \text{EC. 15}$$

1.5.5. Perfil superficial

Es un dato necesario para el diseño del borde libre para los muros laterales del cuenco disipador donde ocurre el resalto. También es útil para determinar la presión que debe ser utilizada en el diseño estructural, debido a que mediante experimentos se ha demostrado que la presión vertical en el piso horizontal bajo un resalto hidráulico es prácticamente la misma que indicaría el perfil de la superficie del agua.

En base a experimentos Bakhmeteff y Matzke encontraron que el perfil de la superficie de un resalto hidráulico se puede representar mediante curvas adimensionales en función de F_1 , como se muestra en la figura 9:

Figura 9. **Perfiles superficiales de resaltos hidráulicos en base a F_1**



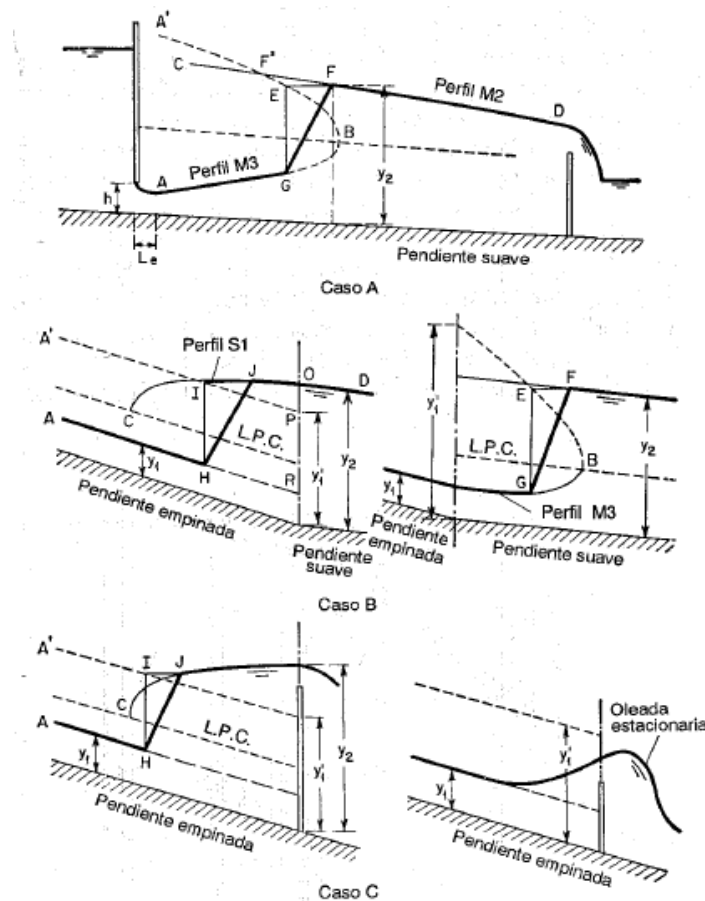
Fuente: www.fluidos.eia.edu.co. Consulta: 2 de abril de 2013.

Por otro lado, Moore desarrolló curvas similares para resaltos por debajo de una caída libre. Los perfiles mostrados por Moore al principio aumentan con mayor rapidez que los perfiles de Bakhmeteff y Matzke. Se cree que se debe a la distribución no hidrostática de presiones en el resalto y que las mediciones piezométricas en los datos de Bakhmeteff y Matzke no se registraron de manera adecuada. Además, la longitud del resalto que dio Moore fue de más o menos un 20 por ciento mayor que la mostrada por las curvas de Bakhmeteff y Matzke. Esto debido a que el resalto en el caso de Bakhmeteff y Matzke se formó aguas debajo de una compuerta deslizante, lo cual hace que cambie debido a la diferencia en el perfil de velocidad del flujo ultrarrápido que entra al resalto.

1.5.6. Localización del resalto

La ubicación del resalto hidráulico depende de las condiciones de flujo tanto aguas arriba como aguas abajo. En teoría, el resalto ocurrirá en un canal horizontal rectangular si cumple con la ecuación 9. Esta ecuación teórica comúnmente se utiliza para localizar la posición exacta de un resalto, sin embargo, debe considerarse la longitud del mismo. En la figura 10 se ilustra la localización de un resalto hidráulico en tres casos comunes:

Figura 10. Localización de un resalto hidráulico



Fuente: CHOW, Ven T. Hidráulica de canales abiertos. p. 392.

El caso A muestra el resalto por debajo de una compuerta deslizante en un canal de pendiente suave. Mediante métodos de cálculo, como por ejemplo la integración gráfica, se puede determinar la longitud del resalto. En el caso A puede observarse que al incrementar la profundidad del agua hacia aguas abajo o al subir la curva CD, el resalto puede moverse hacia aguas arriba. La profundidad de aguas abajo puede subirse hasta una altura para la cual el resalto eventualmente se ahogue al frente de la compuerta deslizante. Al bajar la profundidad de aguas abajo o al disminuir CD el resalto se moverá hacia aguas abajo.

El caso B muestra el resalto en un canal que tiene un quiebre en su pendiente de fondo que cambia de empinada a suave. Por simplicidad, se supone que el flujo es uniforme en todo el canal a excepción del tramo entre el resalto y el quiebre. El resalto puede ocurrir en el canal empinado o en el suave, según si la profundidad aguas abajo y_2 es menor o mayor que la profundidad y_1' seciente a la profundidad de aguas arriba y_1 . Si la profundidad y_2 es mayor que y_1' , el resalto ocurrirá en la región empinada.

El caso C muestra el resalto por detrás de un vertedero. En teoría, se formará un resalto si la profundidad en la barrera es mayor que la profundidad seciente y_1' correspondiente a la profundidad supercrítica de aproximación y_1 . La localización del resalto es igual a la del caso B, si éste ocurre en la región empinada. Al aumentar la altura de la barra el resalto se moverá hacia aguas arriba. Al disminuirla se moverá hacia aguas abajo. Cuando la profundidad de la barrera sea menor que la seciente y_1' , la barrera será sobrepasada por una oleada estacionaria en forma de un ascenso superficial ondular solitario, a la que no seguirán ondulaciones adicionales.

2. USOS Y APLICACIONES DEL RESALTO HIDRÁULICO

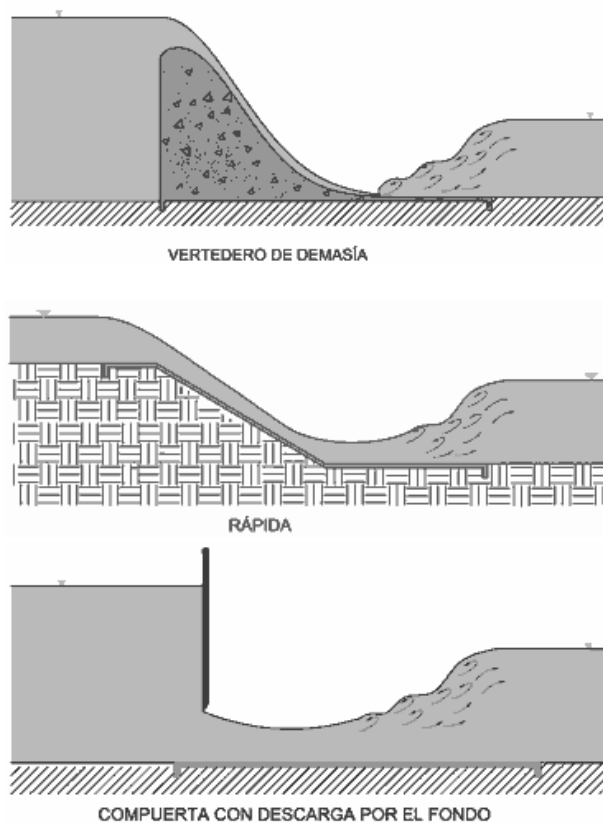
2.1. Aplicaciones prácticas del resalto

Los usos prácticos que se le dan al resalto hidráulico son muchos, entre los más comunes e importantes están los que se detallan e ilustran a continuación, mediante un ejemplo de aplicación del mismo:

- Disipar la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras hidráulicas (ver figura 11).
- Prevención o confinamiento de la socavación aguas abajo de las estructuras hidráulicas.
- La recuperación de carga aguas abajo de un aforador y mantener un nivel alto del agua en el canal de riego o cualquier tipo de estructura para la distribución de agua (ver figura 12).
- Incremento del caudal descargado por una compuerta deslizante, manteniendo alejada la profundidad aguas abajo, esto debido a que la altura efectiva disminuirá si la profundidad aguas abajo ahoga el resalto (ver figura 13).
- Mezclado eficiente de fluidos o de sustancias químicas utilizadas para la purificación del agua, gracias a la naturaleza fuerte de la turbulencia en el resalto (ver figura 14).

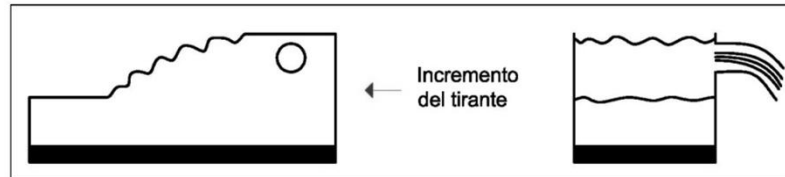
- Aireado del agua en sistemas de suministro de agua.
- Indicación de condiciones especiales de flujo, como la existencia de flujo rápido o la presencia de una sección de control, de tal manera que se pueda identificar una estación de aforo.

Figura 11. **Resalto hidráulico formado en diferentes estructuras hidráulicas**



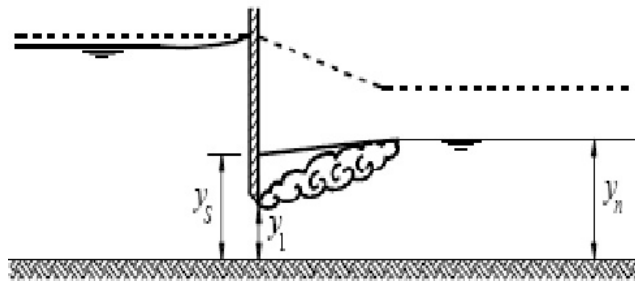
Fuente: www.ingenierocivilinfo.com. Consulta: 5 de abril de 2013.

Figura 12. **Recuperación del tirante aguas abajo del resalto hidráulico**



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Resalto hidráulico ahogado bajo una compuerta**



Fuente: www.slidesharecdn.com/saltohidraulico. Consulta: 5 de abril de 2013.

Figura 14. **Turbulencia en el resalto hidráulico**



Fuente: SANDOVAL, Luis. Presentación de resalto hidráulico, diapositiva 5.

2.1.1. El resalto como disipador de energía

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

Cuando el resalto hidráulico es utilizado para la disipación de energía generalmente se confina parcial o totalmente en un tramo del canal que se conoce como cuenco de disipación o cuenco de aquietamiento, cuyo fondo se recubre para resistir la socavación. En la práctica, el cuenco disipador rara vez se diseña para reducir toda la longitud del resalto debido al alto costo, en cambio, se reduce un porcentaje de la longitud total del resalto instalando accesorios dentro del cuenco para el control del mismo, consiguiendo reducir el tamaño y el costo del cuenco disipador. Dicho control del resalto tiene ventajas adicionales, debido a que mejora la función de disipación del cuenco, estabiliza la acción del resalto y, en algunos casos, aumenta el factor de seguridad.

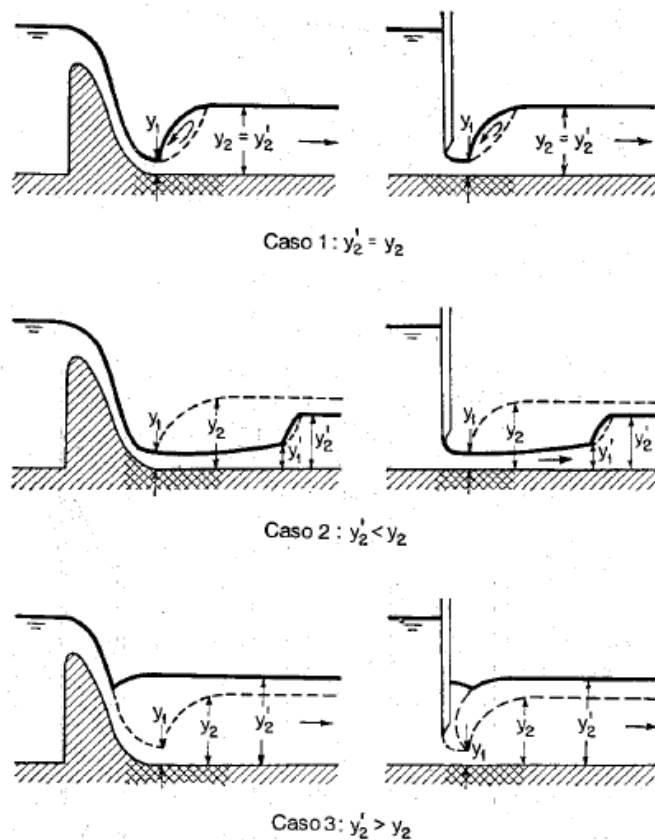
En el diseño de un cuenco disipador con un resalto hidráulico como disipador de energía, deben considerarse los siguientes aspectos prácticos:

- Posición del resalto
- Condiciones de salida
- Tipos de resalto

2.1.1.1. Posición del resalto

Existen tres modelos alternativos (figura 15) que permiten que un resalto se forme aguas abajo de una fuente (vertederos de demasías, rápidas o compuertas deslizantes):

Figura 15. **Efecto de la profundidad de salida en la formación de un resalto aguas abajo de un vertedero o por debajo de una compuerta deslizante**



Fuente: CHOW, Ven T. Hidráulica de canales abiertos. p. 396.

El caso 1 representa el modelo para el cual la profundidad de aguas abajo y_2' es igual a la profundidad y_2 seciente a y_1 . En este caso los valores de F_1 , y_1 y y_2' ($=y_2$) satisfarán la ecuación 9 y el resalto ocurrirá sobre un piso sólido inmediatamente después de la profundidad y_1 . Este es un caso ideal para propósitos de protección contra la socavación. Un aspecto a tomar en cuenta de este modelo es una pequeña diferencia entre los valores reales y los supuestos de los coeficientes hidráulicos relevantes, que puede causar que el resalto se mueva hacia aguas abajo desde su posición estimada, es por eso que, siempre es necesario algún dispositivo para controlar su posición.

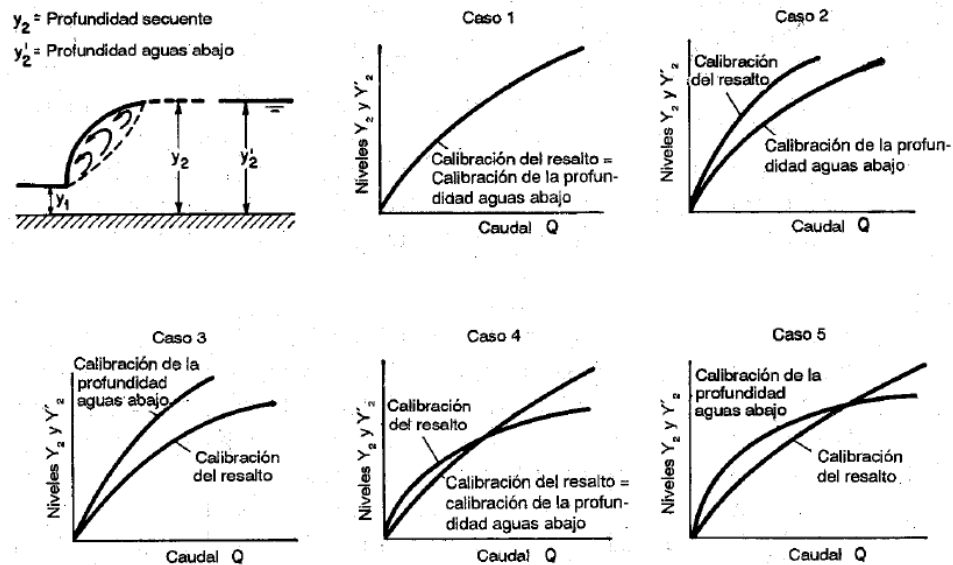
El caso 2 representa el modelo para el cual la profundidad de salida y_2' es menor que y_2 . Esto quiere decir que la profundidad de salida del caso 1 se disminuye. Lo cual da como resultado que el resalto se desplace hacia aguas abajo hasta un punto donde se satisfaga nuevamente la ecuación 9. Este caso debe ser evitado en lo posible, ya que el resalto rechazado fuera de la zona resistente a la socavación ocurrirá en un lecho de cantos rodados sueltos o, peor aún, en un canal completamente desprotegido, causando una erosión severa. La solución para el diseño es utilizar cierto control en el fondo del canal, el cual incrementará la profundidad de agua a la salida y asegurará un resalto dentro de la zona protegida.

El caso 3 representa el modelo en el cual la profundidad de salida y_2' es mayor que y_2 . Esto quiere decir que la profundidad de salida con respecto al caso 1 se incrementa. Lo cual da como resultado que el resalto se verá forzado hacia aguas arriba y finalmente puede ahogarse en la fuente y convertirse en un resalto sumergido. Este caso es tal vez el más seguro para el diseño, ya que la posición del resalto sumergido puede fijarse con rapidez. Pero dicho diseño no es muy eficiente, debido a que la energía que disipa es muy poca.

2.1.1.2. Condiciones de salida

En el caso de la posición del resalto se supone que la profundidad de salida tiene una posición fija, en donde la profundidad y_2' es igual o diferente a y_2 . Sin embargo, en la práctica casi siempre la profundidad de agua a la salida fluctúa, esto debido a cambios en el caudal de flujo en el canal. En dichos casos por lo general se dispone de una curva de calibración de la profundidad de salida que muestra la relación entre el nivel de salida y_2' y el caudal Q . De esta misma manera, puede realizarse una curva de calibración del resalto para mostrar la relación entre la profundidad y_2 y el caudal Q . Debido a la diferencia en la posición relativa de las dos curvas de calibración, Leliavsky sugirió que en el diseño del cuenco pueden considerarse cinco clases de condiciones (figura 16).

Figura 16. Clasificación de las condiciones de salida para el diseño de obras de protección contra la socavación



Fuente: CHOW, Ven T. Hidráulica de canales abiertos. p. 398.

El caso 1 representa una condición ideal, en donde las dos curvas de calibración siempre coinciden. Esto quiere decir que existe el caso 1 de la figura 15 y que siempre se formará un resalto en el lugar deseado sobre una zona protegida para todos los caudales. Estas condiciones por lo general no se dan en la naturaleza.

El caso 2 representa las condiciones en donde la curva de calibración del resalto siempre se encuentra en un nivel mayor que la curva de calibración de profundidad de salida. Esto significa que siempre existe caso 2 en la figura 15 (es decir, que $y_2' < y_2$) y que el resalto se formará en un lugar alejado hacia aguas abajo. Una forma efectiva para asegurar que el resalto ocurra en la zona protegida es utilizar bloques para crear un cuenco disipador.

El caso 3 representa las condiciones en donde la curva de calibración del resalto siempre se encuentra a un nivel menor que la curva de calibración de profundidad de salida. Esto significa que siempre existe caso 3 en la figura 15 (es decir, $y_2' > y_2$) y que el resalto se moverá hacia aguas arriba y puede que se ahogue en la fuente, por lo que se disipará muy poca energía. Una forma efectiva para asegurar un resalto es construir una zona de aproximación por encima del nivel del lecho del canal. La pendiente de aproximación bajo las condiciones adecuadas puede formar un resalto allí para todos los caudales. Otra forma es proveer una caída en el fondo del canal para bajar la profundidad de salida.

El caso 4 representa las condiciones en donde la curva de calibración del resalto está a un nivel mayor que la de calibración de profundidad de salida para caudales bajos, pero a un nivel menor para caudales altos. Una forma efectiva para asegurar un resalto es proveer un cuenco disipador para formarlo

a bajos caudales y combinar el cuenco con una aproximación inclinada para desarrollarlo a conveniencia para todos los caudales.

El caso 5 representa las condiciones en donde la curva de calibración del resalto está a un nivel menor que la de calibración de profundidad de salida para caudales bajos pero a un nivel mayor para caudales altos. Una forma efectiva para asegurar el resalto es aumentando la profundidad aguas abajo lo suficiente, mediante la construcción de una piscina de aquietamiento, formándolo así para caudales altos.

2.1.1.3. Tipos de resalto

Considerando los diferentes tipos de resalto hidráulico descritos en la sección 1.3, el U S Bureau of Reclamation, da las siguientes recomendaciones prácticas para el diseño y construcción de los cuencos disipadores:

- El diseño de los cuencos disipadores es considerado para todos los tipos de resaltos.
- El resalto débil no requiere bloques o consideraciones especiales. Lo único que necesita es dar la longitud apropiada al cuenco, la cual es relativamente corta.
- El resalto oscilante, encontrado a menudo en el diseño de estructuras de canales, presas de derivación y obras de descarga es difícil de manejar. En lo posible, deben evitarse los resaltos con número de Froude dentro del rango de 2,5 a 4,5. En muchos casos no puede evitarse el uso de este resalto pero en otros casos, alterando las dimensiones puede llevarse al rango deseable. Los bloques deflectores o accesorios tienen

muy poco valor. Las ondas son la principal fuente de dificultad; por consiguiente pueden utilizarse supresores de onda diseñados para manejarlas.

- No se encuentra una dificultad particular para el resalto estacionario. Arreglos de deflectores y de bloques son muy útiles como medios para acortar la longitud del cuenco disipador.
- A medida que el número de Froude aumenta, el resalto se vuelve más sensible a la profundidad de salida. Para números de Froude tan bajos como 8, se recomienda una profundidad de salida mayor que la seciente para asegurar que el resalto permanecerá en la zona protegida.
- Cuando el número de Froude es mayor que 10, un cuenco disipador de resalto puede no ser lo más económico. En este caso, la diferencia entre las profundidades inicial y seciente es alta y por lo general, se requiere un cuenco muy profundo con muros de retención muy altos. El costo del cuenco disipador no compensa los resultados obtenidos. Un disipador del tipo cubeta deflectora dará resultados similares a menor costo.

2.2. Control del resalto mediante obstáculos

El resalto hidráulico puede ser controlado o afectado por medio de obstáculos como lo son vertederos de cresta delgada, de cresta ancha y subidas y descensos abruptos en el fondo del canal. La función que tiene el obstáculo es la de asegurar la formación del resalto y controlar su posición en todas las condiciones probables de operación.

Mediante experimentos se ha demostrado que las fuerzas que actúan sobre el obstáculo en un resalto disminuyen rápidamente hasta un mínimo, a medida que el extremo de aguas abajo del resalto se mueve hacia aguas arriba hasta una posición encima del obstáculo. Luego la fuerza se incrementa lentamente hasta un valor constante a medida que el resalto se aleja más hacia aguas arriba. Se cree que este cambio en la fuerza se da debido a la distribución de velocidades desde un extremo del resalto hasta el otro. Esto da como resultado que el *momentum* en la sección de distribución no uniforme se incremente de manera sustancial.

El control del resalto hidráulico mediante obstáculos puede ser analizado teóricamente utilizando la teoría del *momentum*. Pero debido a la falta de conocimiento preciso de la distribución de velocidades, el análisis teórico no puede predecir el resultado cuantitativo con exactitud. Para propósitos de diseño la información útil se consigue mediante estudios experimentales.

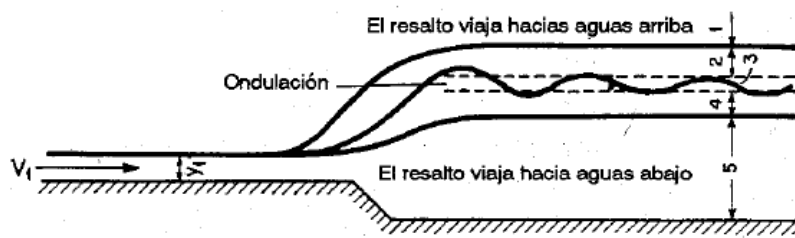
2.3. Control del resalto mediante una caída abrupta

El control del resalto mediante obstáculos es útil si la profundidad de aguas abajo es menor que la profundidad secuente para un resalto normal, pero si la profundidad de aguas abajo es mayor que la profundidad secuente, debe utilizarse una caída en el piso del canal para asegurar el resalto, lo cual ocurre generalmente a la salida de una expansión con flujo supercrítico.

Para determinado número de Froude de aproximación, la profundidad de aguas abajo de una caída puede localizarse en cualquiera de las cinco posibles regiones, como se muestra en la figura 17. El límite inferior de la región 1 es la profundidad para la cual el resalto empezará a viajar hacia aguas arriba. El límite superior de la región 5 es la profundidad para la cual el resalto empezará

a moverse hacia aguas abajo. En efecto, la caída no controla el resalto en estas dos regiones porque éste es estable y la caída es efectiva para sus propósitos deseados sólo en las regiones 2 y 4. La región 3 representa un estado ondulatorio de flujo sin un frente de rompimiento.

Figura 17. **Regiones de la profundidad de aguas debajo de una caída**



Fuente: CHOW, Ven T. Hidráulica de canales abiertos. p. 405.

2.4. Cuencos disipadores

Los cuencos disipadores a menudo son diseñados en general, es decir, que no se diseñan para una situación en específico, esto debido a razones económicas y para que cumplan con las necesidades básicas. Los diseños de los cuencos a menudo están provistos de accesorios especiales, incluidos bloques de rápida, umbrales y bloques de piso o pilares deflectores.

Los bloques de rápida son utilizados para conformar una estructura dentada en la entrada del cuenco disipador. Su función es partir el chorro de entrada y elevar una parte de él desde el piso, produciendo una longitud de resalto más corta que la que sería posible sin ellos. Estos bloques también tienden a estabilizar el resalto y por consiguiente a mejorar su comportamiento.

Los umbrales dentados o sólidos, son colocados por lo general al final del cuenco disipador (ver figura 18). Su función es reducir la longitud del resalto y controlar la socavación. Para cuencos grandes diseñados para altas velocidades de entrada, el umbral por lo general es dentado para llevar a cabo la función adicional de difundir la parte residual del chorro de alta velocidad que puede alcanzar el extremo del cuenco.

Los pilares deflectores son bloques que se encuentran en posiciones intermedias sobre el piso del cuenco. Su función es disipar la energía principalmente mediante una acción de impacto. Los bloques deflectores son muy útiles en pequeñas estructuras con velocidades de entrada bajas. Sin embargo, no son recomendables cuando las altas velocidades hacen posible la cavitación. En ciertas circunstancias, deben diseñarse para soportar el impacto del hielo o desechos flotantes.

Existen muchos diseños generalizados de cuencos disipadores que utilizan un resalto hidráulico como medio para la disipación de energía. Los cuatro diseños que se describirán son:

- El cuenco SAF
- El cuenco USBR II
- El cuenco USBR III
- El cuenco USBR IV

Se debe tomar en cuenta que estos diseños son sólo ejemplos comunes y que a la hora de ser utilizados debe tomarse en cuenta las diferentes condiciones que existan.

El principio del cuenco disipador también se aplica al diseño de una caída de canal, la cual es una estructura construida para asegurar un descenso en la superficie del agua de un canal y la eliminación segura de la energía. La caída del canal algunas veces se diseña con un ancho contraído, parecido al de la canaleta Parshall y se conoce como caída contraída, la cual puede construirse a bajo costo en conjunto con un puente y utilizarse también como un medidor o regulador.

2.4.1. Cuenco disipador SAF

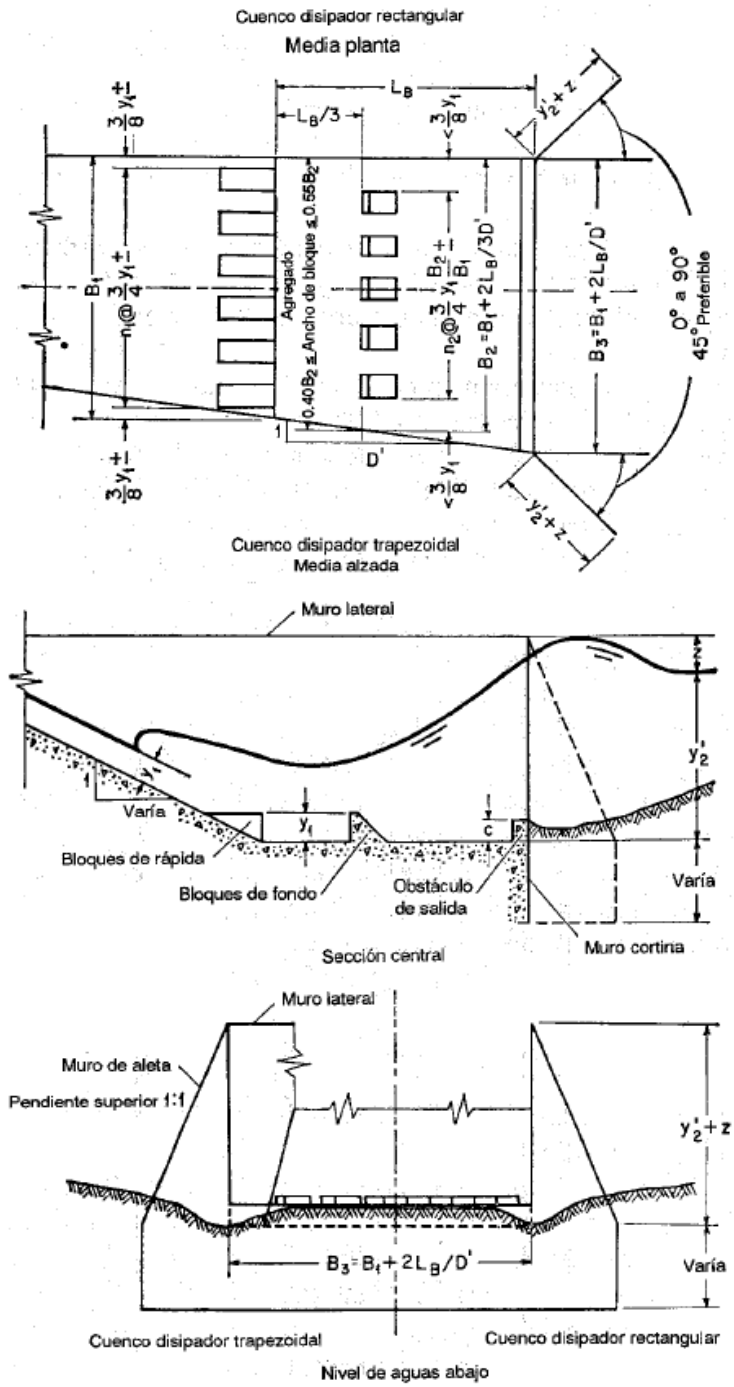
Este cuenco (figura 18; SAF proviene del inglés San Anthony Falls, Cataratas de San Antonio) se desarrolló en el Laboratorio de Hidráulica San Anthony Falls, en la Universidad de Minnesota. Se recomienda para ser utilizado en estructuras pequeñas de vertederos, obras de salida y canales donde $F_1 = 1,7$ a 17 . La reducción en la longitud del cuenco conseguida por el uso de accesorios diseñados para el mismo es de alrededor del 80 por ciento (70 a 90 por ciento). El cuenco contiene bloques de rápida, bloques de piso y un umbral de salida. Las normas de diseño resumidas por el investigador Blaisdell son las siguientes:

- La longitud L_B del cuenco disipador para números de Froude entre $F_1 = 1,7$ y $F_1 = 17$ se determina mediante $L_B = 4,5y_2 / F_1^{0,76}$.
- La altura de los bloques de entrada y los bloques del piso es y_1 y su ancho y espaciamiento es aproximadamente $0,75 y_1$.
- La distancia desde el extremo de aguas arriba del cuenco disipador hasta los bloques del piso es $L_B/3$.

- No deben localizarse 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 rápida.
- Los bloques del piso deben ocupar entre el 40 y el 55 por ciento del ancho del cuenco disipador.
- Los anchos y el espaciamiento 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 $y_2' = (1,10 - F_1^2/120) y_2$ para $F_1 = 1,7$ a $5,5$; por $y_2' = 0,85y_2$ para $F_1 = 5,5$ a 11 ; y por $y_2' = (1,00 - F_1^2/800) y_2$ para $F_1 = 11$ a 17 .
- 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 de 1 a 1.

- El muro de salida debe localizarse con un ángulo de 45 grados con respecto al eje central de la 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 utilizarse 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.

Figura 18. Dimensiones del cuenco SAF



Fuente: CHOW, Ven T. Hidráulica de canales abiertos. p. 407.

2.4.2. Cuenco disipador USBR II

El U S Bureau of Reclamation luego de realizar diversos estudios desarrolló varios tipos de diseños generalizados de cuencos disipadores.

El cuenco USBR I lo origina un resalto hidráulico que ocurre en un piso plano sin ningún tipo de accesorio, pero debido a su extensa longitud se hace muy costoso y es muy difícil de controlar. El cuenco USBR V es utilizado cuando la economía estructural implica el uso de un canal de aproximación inclinado, el cual es usual en vertederos de presas altas.

El cuenco USBR II se recomienda para ser utilizado en estructuras grandes de vertederos y canales, donde $F_1 > 4,5$. La longitud del resalto y del cuenco se reduce alrededor de un 33 por ciento mediante el uso de los accesorios. El cuenco contiene bloques en la rápida del extremo aguas arriba y un umbral dentado cerca del extremo aguas abajo. No se utilizan bloques de impacto debido a que las velocidades relativamente altas que entran al resalto pueden causar cavitación en dichos bloques. En la figura 19 se muestra el diseño detallado y los datos necesarios para el cálculo. Las normas para el diseño son las siguientes:

- Fijar la elevación del piso para utilizar la profundidad secuente de aguas abajo completa, más un factor de seguridad adicional si es necesario. Las líneas punteadas en la figura 19a sirven como guía para diferentes relaciones de la profundidad real aguas abajo con respecto a la profundidad secuente. Estudios de diseños existentes indican que la mayor parte de los cuencos se diseñaron para profundidades de salida secuentes o menores. Sin embargo, existe un límite, el cual es establecido por la curva denominada mínima profundidad de salida, que

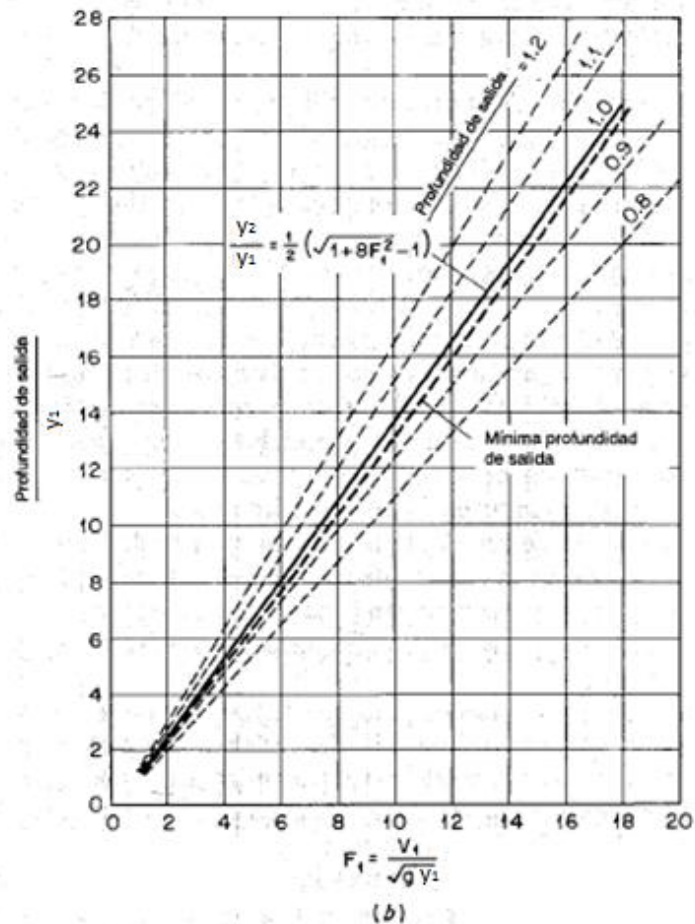
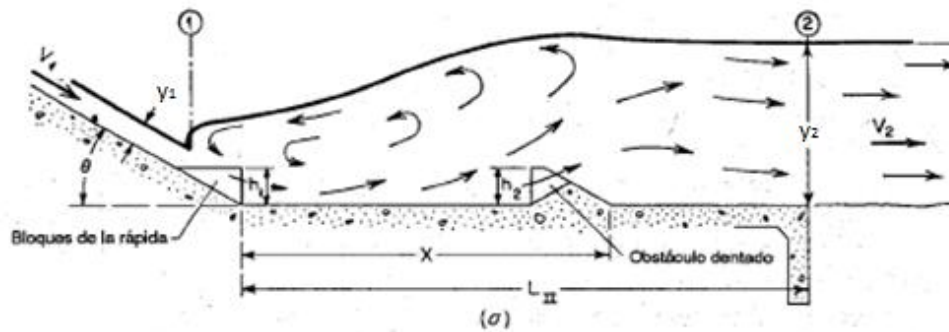
indica el punto para el cual el frente del resalto se mueve hacia afuera de los bloques de la rápida. En otras palabras, cualquier reducción adicional de la profundidad de salida hará que el resalto se salga del cuenco; es decir, producirá un barrido de resalto. El cuenco no debe diseñarse para una profundidad menor que la seciente. Para mayor seguridad el Bureau recomienda un margen de seguridad mínimo del 5 por ciento de y_2 , que debe sumarse a la profundidad seciente.

- El cuenco II puede ser efectivo hasta un número de Froude tan bajo como 4, pero para valores menores esto no necesariamente es cierto. Para valores bajos, se recomiendan diseños que consideren la supresión de ondas.
- La longitud del cuenco puede obtenerse de la curva de longitud del resalto, dada en la figura 19c.
- La altura de los bloques de la rápida es igual a la profundidad y_1 del flujo que entra al cuenco. El ancho y el espaciamiento deben ser aproximadamente iguales a y_1 ; sin embargo, esto puede modificarse para eliminar la necesidad de fracciones de bloques. Con respecto a las paredes laterales es preferible un espaciamiento igual a $0,5y_1$ para reducir salpicaduras y mantener presiones adecuadas.
- La altura del umbral dentado es igual a $0,2y_2$, y el ancho máximo y el espaciamiento máximos recomendados son aproximadamente $0,15y_2$. En este diseño se recomienda colocar un bloque adyacente a cada pared lateral (figura 19e). La pendiente de la parte continua del umbral de salida es 2:1. En el caso de cuencos angostos, lo cual involucraría sólo algunos dientes según la regla anterior, es recomendable reducir el

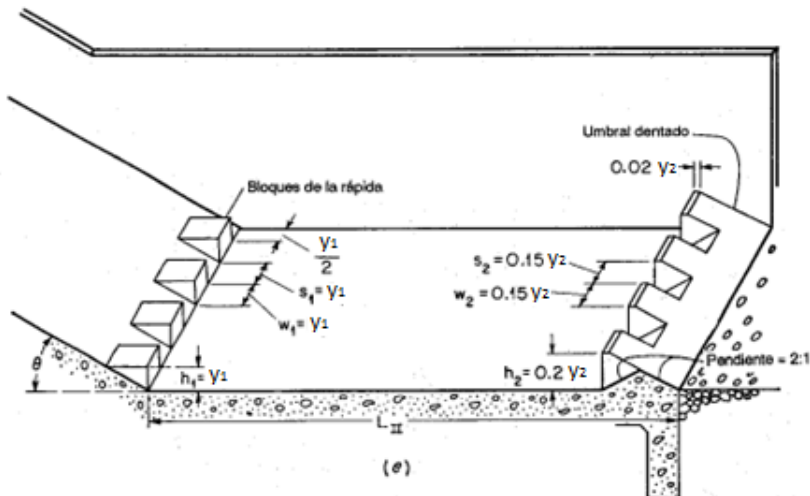
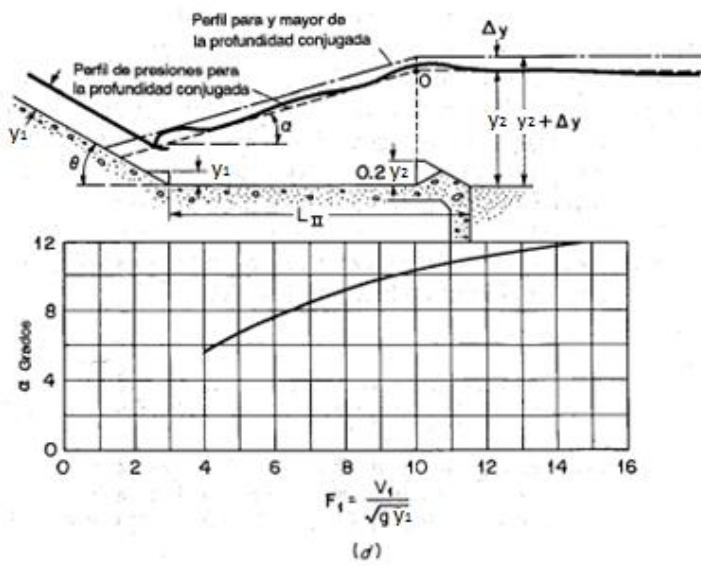
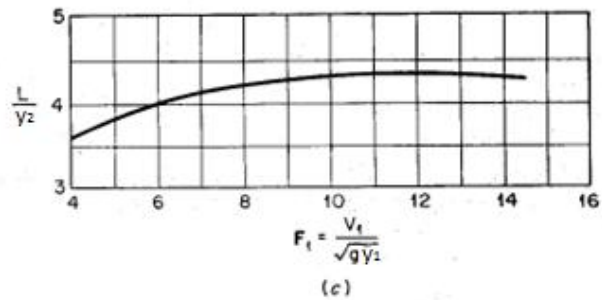
ancho y el espaciamiento, siempre y cuando esto se haga de manera proporcional. La reducción del ancho y del espaciamiento en realidad mejora el comportamiento en estos cuencos; luego los anchos y los espaciamientos mínimos entre los dientes se establecen sólo por consideraciones estructurales.

- No es necesario escalonar los bloques de la rápida y el umbral dentado. De hecho, esta práctica no es recomendable desde un punto de vista constructivo.
- Las pruebas de verificación sobre los cuencos II no indican cambios perceptibles en la acción del cuenco disipador con respecto a la pendiente de la rápida aguas arriba del cuenco. En estas pruebas la pendiente de la rápida varía desde 0.6:1 a 2:1. En realidad, la pendiente de la rápida tiene un efecto sobre el resalto hidráulico en algunos casos. Es recomendable que la intersección aguda entre la rápida y el cuenco se reemplace por una curva de radio razonable ($R \geq 4y_1$) cuando la pendiente de la rápida es 1:1 o mayor. Los bloques de la rápida pueden incorporarse a la superficie curva con tanta facilidad como a las planas. En rápidas empinadas la longitud de la superficie superior de los bloques debe hacerse lo suficientemente larga para deflectar el chorro.
- Los perfiles de aproximación para la superficie del agua y para las presiones de un resalto en el cuenco se muestran en la figura 19d.

Figura 19. **Curvas de diseño y dimensiones del cuenco USBR II. (a) definición de símbolos; (b) profundidades de salida mínima; (c) longitud del resalto hidráulico; (d) superficie del agua y perfiles de flujo aproximados; (e) dimensiones recomendadas**



Continuación de la figura 19.



Fuente: CHOW, Ven T. Hidráulica de canales abiertos. p. 411.

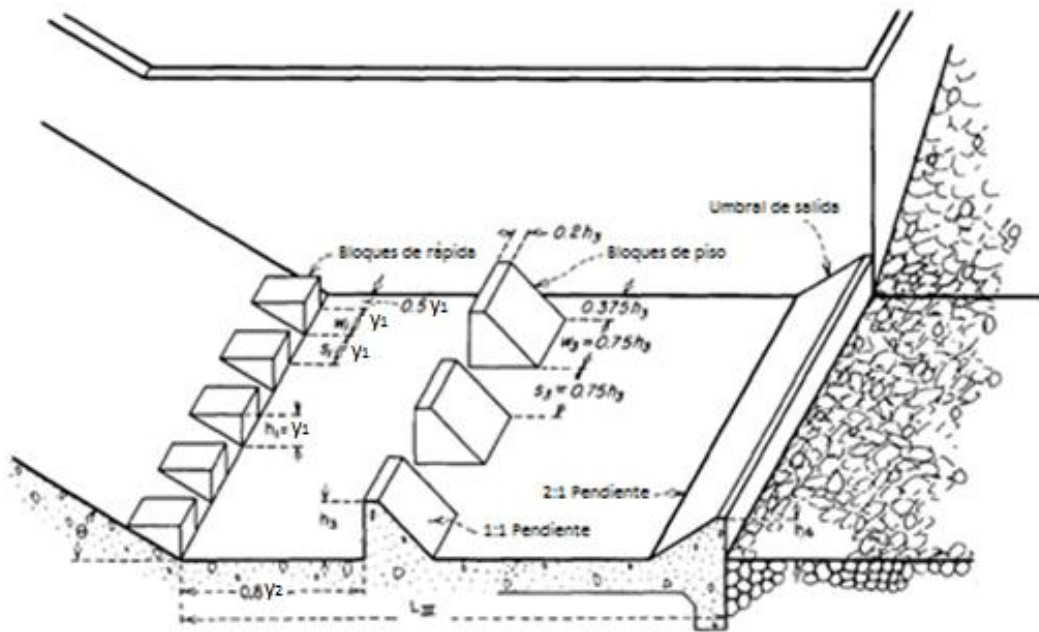
2.4.3. Cuenco disipador USBR III

El cuenco USBR III es más corto que el tipo II. Se recomienda para ser utilizado en estructuras de salida, pequeños vertederos y en pequeñas estructuras de canal, donde $F_1 > 4,5$. Este cuenco se diseña para un propósito similar al del cuenco SAF, pero tiene un factor de seguridad mayor, ajustado a las necesidades del Bureau. El comportamiento de este cuenco indica que su longitud y la del resalto pueden reducirse alrededor del 60 por ciento, con accesorios, en comparación con el 80 por ciento para el cuenco SAF. Por consiguiente, el cuenco SAF es más corto y más económico, pero menos seguro. El cuenco contiene bloques en la rápida, bloques de piso y un umbral sólido de salida. En la figura 20 se muestra el diseño detallado y los datos necesarios para el cálculo. Las normas para el diseño son las siguientes:

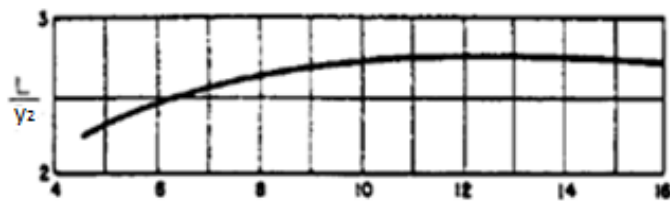
- El cuenco opera mejor con la profundidad completa conjugada al final del resalto y_2 . Un factor de seguridad razonable debe ser inherente en la profundidad de agua para todos los números de Froude.
- La longitud del cuenco es menor que la mitad de la longitud de un resalto natural, puede calcularse con la figura 20b.
- Este cuenco 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 rápida deben ser aproximadamente iguales a y_1 ; sin embargo, esto puede disminuirse para eliminar la necesidad de fracciones de bloques. Con respecto a las paredes laterales es preferible un espaciamiento igual a $0,5y_1$ para reducir salpicaduras y mantener presiones adecuadas.

- La altura de los bloques de piso varía con respecto al número de Froude, según la figura 20c. El ancho y espaciamiento de los bloques de piso deberán ser aproximadamente $0,75h_3$, podrán ser reducidas si así se requiere. La separación de los bloques de piso y las paredes laterales será de $0,375h_3$.
- La cara vertical de los bloques de piso deberán fijarse a una distancia de $0,8$ de y_2 del final de los bloques de la rápida.
- La altura del umbral de salida se da en la figura 20c. La pendiente es 2:1 hacia arriba en la dirección del flujo.
- No es recomendable redondear o aerodinamizar las esquinas de los bloques de la rápida, bloques de piso o umbral de salida, ya que podría resultar en la pérdida de la mitad de eficiencia. Es posible utilizar un pequeño borde plano para evitar el astillado de los mismos.
- Es recomendable un radio de intersección $R \geq 4y_1$ para la plataforma y la rampa cuando hay ángulos de 45 grados o más.
- La pendiente de la rampa tiene muy poco efecto en el resalto, a menos que estén involucradas largas pendientes planas.

Figura 20. **Curvas de diseño y dimensiones del cuenco USBR III.**
(a) dimensiones recomendadas; (b) longitud del resalto hidráulico;
(c) altura de bloques de rápida y bloques de piso



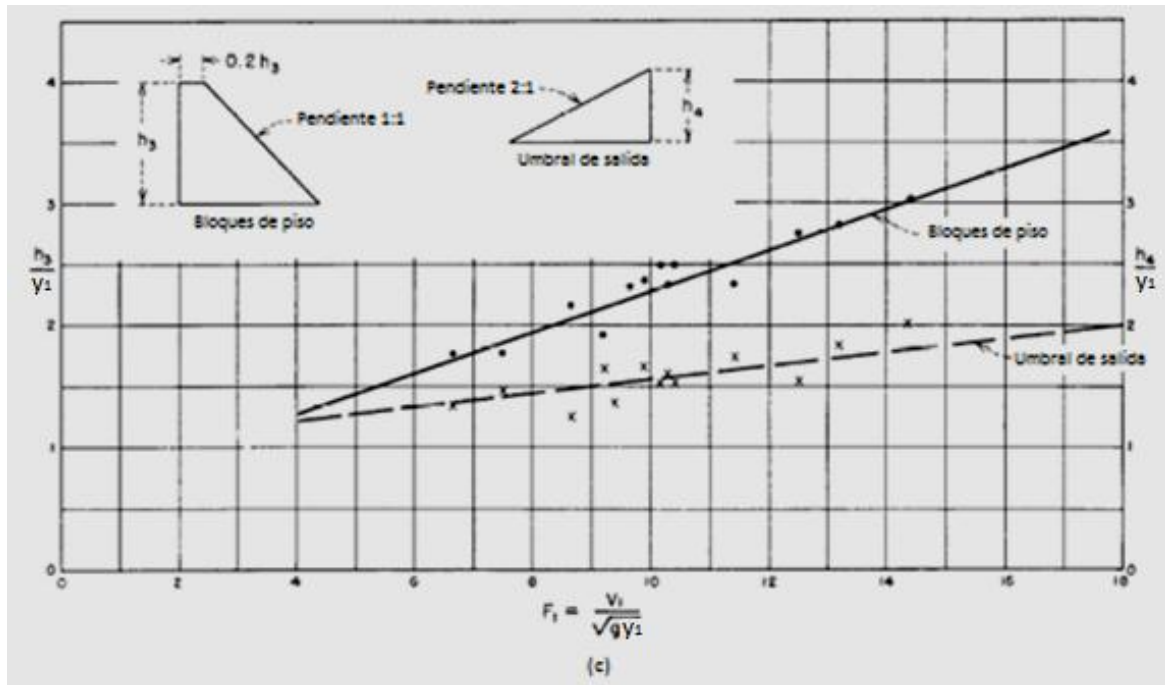
(a)



$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}}$$

(b)

Continuación de la figura 20.



Fuente: A. J. PETERKA. *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*. p. 37.

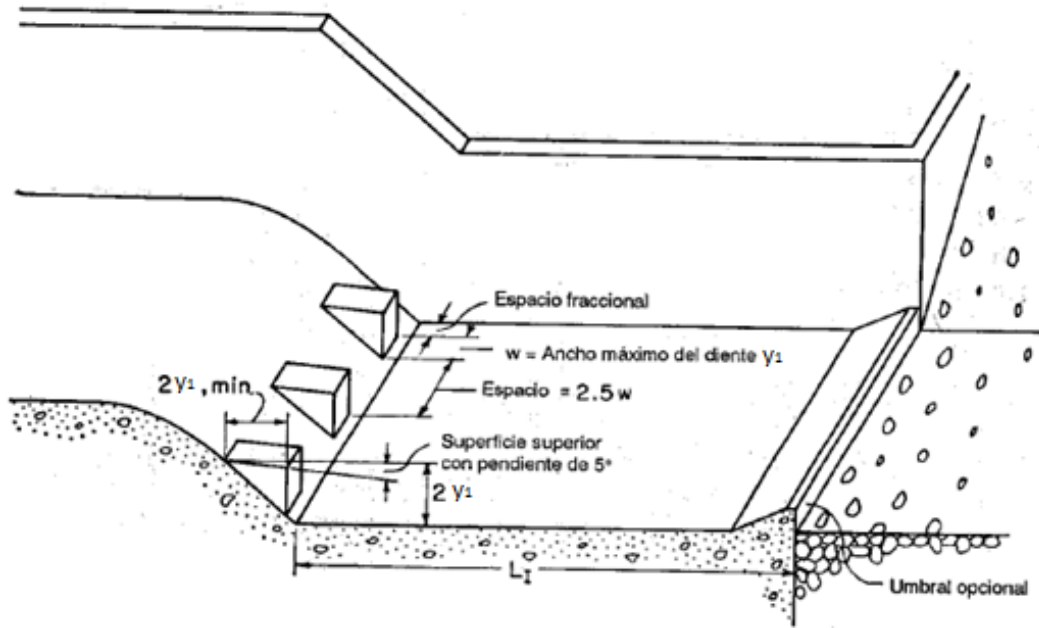
2.4.4. Cuenco disipador USBR IV

El cuenco USBR IV (figura 21) se recomienda para ser utilizado con resaltos de $F_1 = 2,5$ a $4,5$, lo cual a menudo ocurre en estructuras de canal y en presas de derivación, donde se genera una onda que es difícil de atenuar. Este cuenco se diseña para eliminar este problema, eliminando la onda en su fuente. Esto se lleva a cabo intensificando el remolino que aparece en la parte superior del resalto con los chorros direccionales deflectados, utilizando grandes bloques en la rápida, cuyo número mínimo requerido para este propósito se muestra en la figura 21.

Para un comportamiento hidráulico mejor, es conveniente construir estos bloques más angostos que lo indicado, preferiblemente con un ancho igual a $0,75y_1$, y fijar la profundidad de salida de tal manera que sea un 5 a 10 por ciento mayor que la profundidad secuente del resalto. El umbral opcional servirá para el control de la socavación y su colocación dependerá del comportamiento del resalto, es de forma triangular, colocado al extremo de la plataforma, con una pendiente en la cara aguas arriba de 2:1 y una altura h_4 que puede ser determinada mediante la curva de la figura 20c.

La longitud del cuenco se hace igual a la del resalto en un cuenco disipador horizontal sin accesorios y, por consiguiente, puede determinarse mediante la curva de la figura 8 (es decir, también igual a la longitud del cuenco USBR I o L_1). El cuenco IV sólo se utiliza en las secciones transversales rectangulares. Debido a la complejidad en la construcción del modelo, éste no se tomará en cuenta para los ensayos.

Figura 21. Dimensiones del cuenco USBR IV



Fuente: CHOW, Ven T. Hidráulica de canales abiertos. p. 413.

3. ENSAYOS DE LABORATORIO CON CUENCOS DISIPADORES

3.1. Diseño y construcción de cuencos disipadores

Para la construcción de los modelos de los cuencos disipadores para el control del resalto hidráulico se utilizó material de tipo acrílico, con un espesor de 3 milímetros; y para los bloques de la rápida, bloques de piso y umbral de salida, piezas de madera de diferentes tamaños.

Para los ensayos de laboratorio se utilizó el canal hidrodinámico del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el cual es abastecido de agua por medio de un sistema de bombeo.

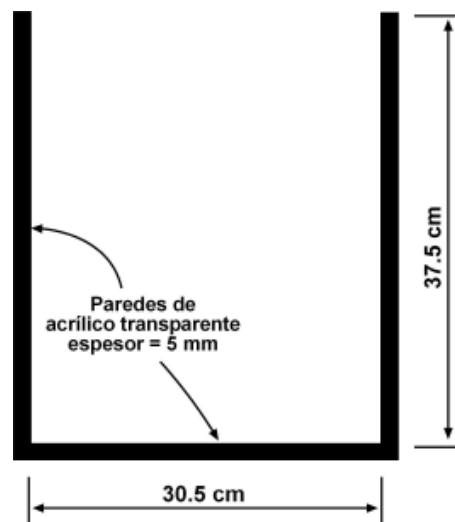
Figura 22. **Canal hidrodinámico**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

El canal tiene una sección rectangular, cuyas dimensiones se presentan en la figura 23, el cual fue construido con planchas de acrílico transparente, con un grosor de 5 milímetros, reforzado en vértices y uniones con una estructura de acero.

Figura 23. **Sección de canal**



Fuente: LUX, Manuel. Medidores de flujo en canales abiertos. p. 36.

Para la determinación de los caudales se aforó mediante el método volumétrico, donde se conoce el volumen del tanque calibrado y el tiempo de llenado, mediante un cronómetro.

Figura 24. **Método de aforo en el canal**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

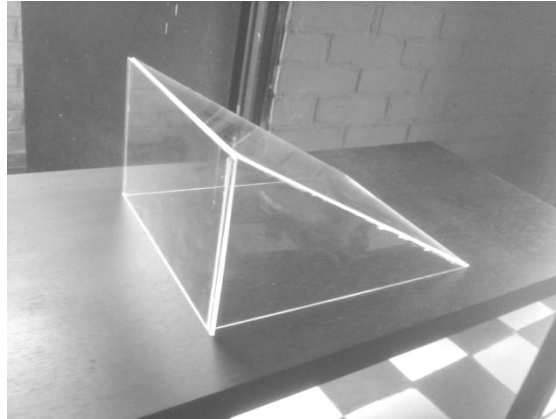
3.1.1. Construcción de rápidas o rampas

Para el diseño y construcción de cada uno de los cuencos fue necesario primero construir rápidas o rampas, con diferentes pendientes para ser utilizadas en cada cuenco, según los resultados que dieran en cuanto a tirante inicial y caudal, ya que dependiendo del número de Froude inicial así será el cuenco a utilizar, además para el cálculo de las dimensiones de cada uno de los bloques. La rápida es la que crea un flujo supercrítico, el cual es lo primero para poder generar el resalto hidráulico. El flujo toma la forma empinada de la rápida, generando diferentes tirantes iniciales, antes de formar el resalto.

3.1.1.1. Rápida con pendiente 2:1

Esta rápida se construyó con dimensiones de 40 centímetros de largo, por 20 centímetros de altura y de ancho igual al del canal, es decir, de 30,5 centímetros, quedando como se ve en la figura 25.

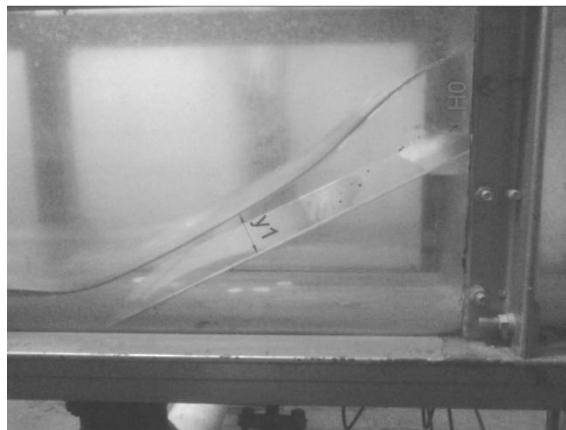
Figura 25. **Rápida con pendiente 2:1**



Fuente: elaboración propia.

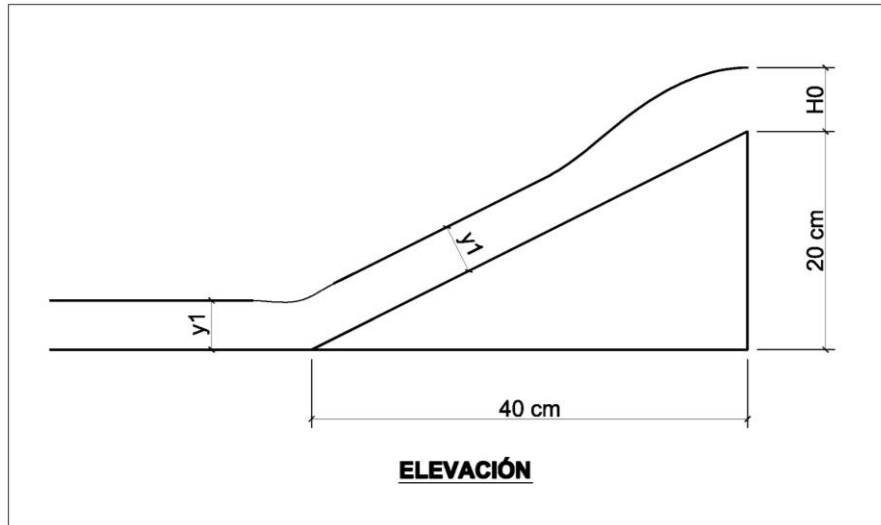
Una vez lista la rápida se procedió a instalarla en el canal del laboratorio para realizar los ensayos, midiendo la carga sobre la cresta de la rápida (H_0), tirante inicial (y_1) y caudal (Q). En la figura 26 se puede observar cómo se crea el flujo supercrítico tomando la forma empinada de la rápida.

Figura 26. **Ensayo de rápida con pendiente 2:1**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 27. **Rápida acotada con pendiente 2:1**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla II. **Resultados obtenidos en ensayo de rampa con pendiente 2:1**

Ensayo	H0 (cm)	y1 (cm)	t1 (s)	V1 (l)	t2 (s)	V2 (l)	Q1 = V1/t1 (l/s)	Q2 = V2/t2 (l/s)
1	9,5	4,5	19,12	456,17	19,28	459,90	23,86	23,85
2	8	3,2	26,07	445,75	26,29	452,45	17,10	17,21
3	7	2,4	36,56	445,75	37,75	457,66	12,19	12,12

Fuente: elaboración propia.

Con los resultados obtenidos y calculando el caudal promedio se procede a calcular el número de Froude inicial (F_1) con la ecuación 8:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{Q/A}{\sqrt{gy_1}}$$

Donde: $Q = (\text{cm}^3/\text{s})$
 $A = \text{base del canal por } y_1 (\text{cm}^2)$
 $g = 981 (\text{cm}/\text{s}^2)$
 $y_1 = (\text{cm})$

Primera iteración:

$$F_1 = \frac{23860 \text{ cm}^3/\text{s}}{\sqrt{981 \text{ cm}/\text{s}^2 \times 4,5 \text{ cm}}} = 2,62$$

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla III. **Número de Froude inicial para rampa con pendiente 2:1**

Ensayo	y1 (cm)	Q prom (l/s)	Q prom (cm³/s)	A (cm²)	F1
1	4,5	23,86	23,860	137,25	2,62
2	3,2	17,16	17,160	97,60	3,14
3	2,4	12,16	12,160	73,20	3,42

Fuente: elaboración propia.

3.1.1.2. Rápida con pendiente 0.9:1

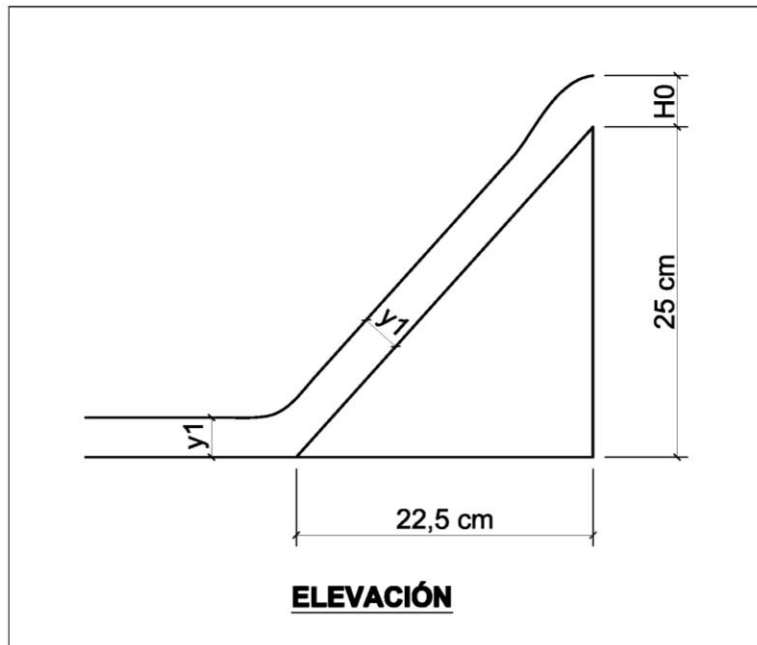
Esta rápida se construyó con dimensiones de 22,5 centímetros de largo, por 25 centímetros de altura y de ancho igual al del canal, es decir, de 30,5 centímetros. Ya instalada en el canal del laboratorio se realizan los ensayos midiendo la carga sobre la cresta de la rápida (H_0), tirante inicial (y_1) y caudal (Q).

Figura 28. Ensayo de rápida con pendiente 0.9:1



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 29. **Rápida acotada con pendiente 0.9:1**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla IV. **Resultados obtenidos en ensayo de rampa con pendiente 0.9:1**

Ensayo	H0 (cm)	y1 (cm)	t1 (s)	V1 (l)	t2 (s)	V2 (l)	Q1 = V1/t1 (l/s)	Q2 = V2/t2 (l/s)
1	6	1,9	38,31	436,84	37,91	435,35	11,40	11,48
2	7	2,1	35,66	457,66	34,43	442,78	12,83	12,86
3	7,5	2,5	33,22	485,32	29,94	440,55	14,61	14,71
4	5,5	1,6	49,84	449,47	48,06	436,09	9,02	9,07

Fuente: elaboración propia.

Con los resultados obtenidos y calculando el caudal promedio se procede a calcular el número de Froude inicial (F_1) con la ecuación 8:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{Q/A}{\sqrt{gy_1}}$$

Donde: $Q = (\text{cm}^3/\text{s})$
 $A = \text{base del canal por } D_1 (\text{cm}^2)$
 $g = 981 (\text{cm}/\text{s}^2)$
 $y_1 = (\text{cm})$

Primera iteración:

$$F_1 = \frac{\frac{11440 \text{ cm}^3/\text{s}}{30,5 \text{ cm} \times 1,9 \text{ cm}}}{\sqrt{981 \text{ cm}/\text{s}^2 \times 1,9 \text{ cm}}} = 4,57$$

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla V. **Número de Froude inicial para rampa con pendiente 0.9:1**

Ensayo	y1 (cm)	Q prom (l/s)	Q prom (cm ³ /s)	A (cm ²)	F1
1	1,9	11,44	11,440	57,95	4,57
2	2,1	12,85	12,850	64,05	4,42
3	2,5	14,66	14,660	76,25	3,88
4	1,6	9,05	9,050	48,80	4,68

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Diseño, dimensionamiento y construcción de cuenco SAF

El cuenco SAF, como se indicó anteriormente se utiliza para un $F_1 = 1,7$ a 17, por lo que se considera utilizar para el diseño y construcción del cuenco la rápida con pendiente 2:1, específicamente con los resultados del ensayo 2 indicados en la tabla III, donde $F_1 = 3,14$ y $y_1 = 3,2$ centímetros. El diseño se hizo con estos datos, pero no quiere decir que el cuenco vaya a funcionar para un solo caudal, tirante o número de Froude, ya que toda obra hidráulica trabaja con cierto rango, de forma efectiva y con un fin determinado.

Siguiendo las normas de diseño para el cuenco SAF indicadas en la sección 2.4.1 se tiene el cálculo de las dimensiones:

3.1.2.1. Longitud del cuenco

La longitud del cuenco, se calcula con la fórmula de la norma de diseño que dice que $L_B = 4,5y_2 / F_1^{0,76}$, de donde $F_1 = 3,14$ y para el cálculo de y_2 con la ecuación 9 despejando dicho tirante 2 se tiene:

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

Cálculo de y_2 :

$$y_2 = \frac{3,2 \text{ cm}}{2} \left(\sqrt{8(3,14)^2 + 1} - 1 \right)$$
$$y_2 = 12,70 \text{ cm}$$

Cálculo de L_B :

$$L_B = \frac{4,5y_2}{F_1^{0,76}}$$
$$L_B = \frac{4,5(12,70 \text{ cm})}{(3,14)^{0,76}}$$
$$L_B = 23,95 \text{ cm}$$

3.1.2.2. Bloques de rápida

Son los bloques que van colocados al final de la rápida, para dichos bloques se detalla y se calculan las dimensiones conforme a las normas de diseño respectivas.

- La altura de los bloques de rápida es:

$$\text{Altura de bloques de rápida} = y_1$$

$$\text{Altura de bloques de rápida} = 3,2 \text{ cm}$$

- La separación de los extremos laterales y el primer bloque de rápida es:

$$\text{Separación de extremos} = \frac{3}{8}y_1$$

$$\text{Separación de extremos} = \frac{3}{8}(3,2 \text{ cm})$$

$$\text{Separación de extremos} = 1,2 \text{ cm}$$

- El ancho y espaciamiento (n_1) es de aproximadamente:

$$n_1 = 0,75y_1$$

$$n_1 = 0,75 \times 3,2 \text{ cm}$$

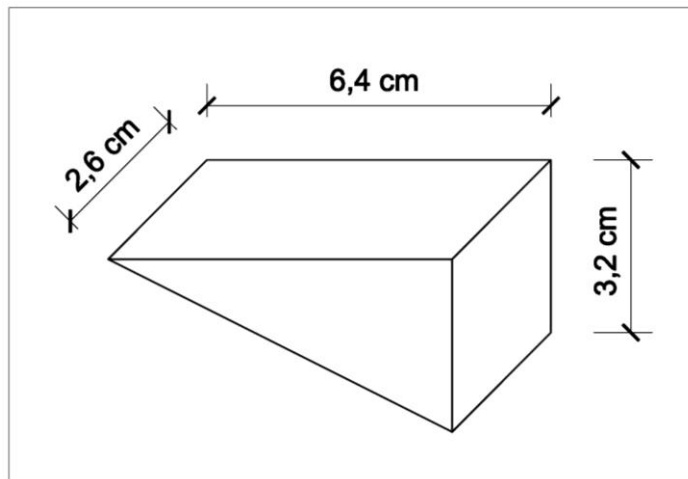
$$n_1 = 2,4 \text{ cm}$$

Para saber la cantidad de bloques de rápida que llevará el cuenco se debe tomar en cuenta el ancho del canal, que es de 30,5 centímetros, dividiendo entre los 2,4 centímetros de ancho y espaciamiento de los bloques da un total de 12,7, pero para no tener medios bloques se modifica la separación de los extremos, el ancho y espaciamiento, quedando de la siguiente manera:

- Separación de los extremos = 0,95 cm
- $n_1 = 2,6 \text{ cm}$

Con un total de 6 bloques de rápida y 5 espacios entre sí, más la separación de los extremos, da el total del ancho del canal. El largo de los bloques quedó en 6,4 centímetros, considerando la pendiente de la rápida.

Figura 30. **Bloques de rápida de cuenco SAF**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

3.1.2.3. Bloques de piso

Son los bloques que van colocados después de los bloques de rápida, para dichos bloques se detalla y se calculan las dimensiones conforme a las normas de diseño respectivas.

- La altura de los bloques de piso es:

$$\text{Altura de bloques de piso} = y_1$$

$$\text{Altura de bloques de piso} = 3,2 \text{ cm}$$

- La separación de los extremos laterales y el primer bloque de piso es mínimo de:

$$\text{Separación de extremos} = \frac{3}{8}y_1$$

$$\text{Separación de extremos} = \frac{3}{8}(3,2 \text{ cm})$$

$$\text{Separación de extremos} = 1,2 \text{ cm}$$

- El ancho y espaciamiento (n_2) es de aproximadamente:

$$n_2 = 0,75y_1$$

$$n_2 = 0,75 \times 3,2 \text{ cm}$$

$$n_2 = 2,4 \text{ cm}$$

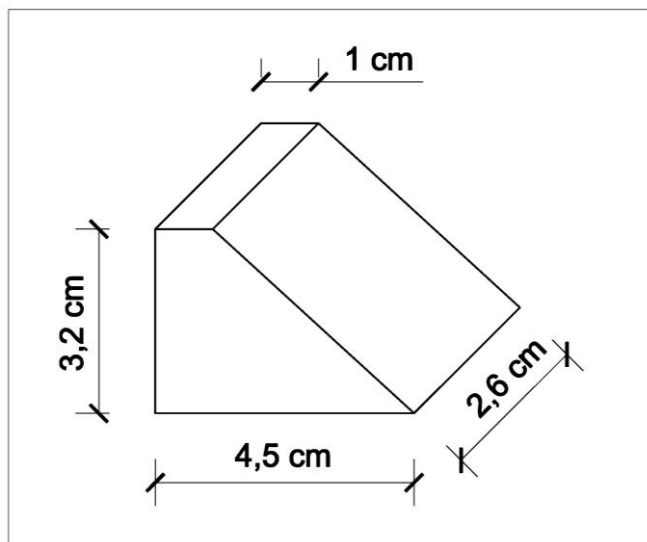
Para saber la cantidad de bloques de piso que llevará el cuenco se debe tomar en cuenta el ancho del canal, que es de 30,5 centímetros y la norma de diseño que dice que los bloques de piso deben localizarse aguas abajo,

enfrentados a las aberturas entre los bloques de rápida, tomando en cuenta esto y para que no queden medios bloques se modificó la separación de los extremos, el ancho y espaciamiento, quedando de la siguiente manera:

- Separación de los extremos = 3,55 cm
- $n_2 = 2,6$ cm

Quedando de esta manera un total de 5 bloques de piso y 4 espacios entre cada uno de ellos, más la separación de los extremos da el total del ancho del canal. Para el largo y el borde plano de los bloques de 4,5 centímetros y 1 centímetro respectivamente, se toma a criterio propio, ya que no influyen de gran manera en el comportamiento del resalto hidráulico.

Figura 31. **Bloques de piso de cuenco SAF**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

Una norma de diseño indicada en la sección 2.4.1 menciona que el porcentaje que ocupen los bloques de piso, respecto al ancho del canal debe estar entre el 40 y el 55 por ciento. Teniendo 5 bloques por los 2,6 centímetros que tienen de ancho, da un total de 13 centímetros, respecto a los 30,5 centímetros de ancho del canal, ocupan un porcentaje de 42,6 por ciento, quedando dentro del rango permitido.

La distancia entre los bloques de rápida y los de piso es de:

$$\text{Distancia entre bloques de rápida y de piso} = \frac{L_B}{3}$$

$$\text{Distancia entre bloques de rápida y de piso} = \frac{23,95 \text{ cm}}{3}$$

$$\text{Distancia entre bloques de rápida y de piso} = 7,98 \text{ cm}$$

3.1.2.4. Umbral de salida

El umbral de salida, como su nombre lo indica, va al final del cuenco disipador, es decir; después de los bloques de piso. La altura del umbral de salida esta dado por $c = 0,07y_2$, donde y_2 calculado anteriormente resultó en 12,70 centímetros.

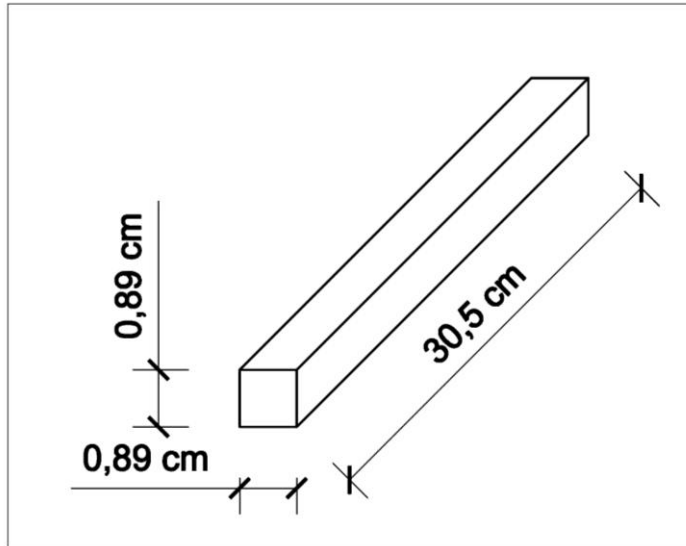
$$c = 0,07y_2$$

$$c = 0,07 \times 12,70 \text{ cm}$$

$$c = 0,89 \text{ cm}$$

Teniendo la altura de 0,89 centímetros y considerando una sección transversal cuadrada y el ancho del canal, el umbral de salida queda como se muestra en la figura 32.

Figura 32. **Umbral de salida de cuenco SAF**



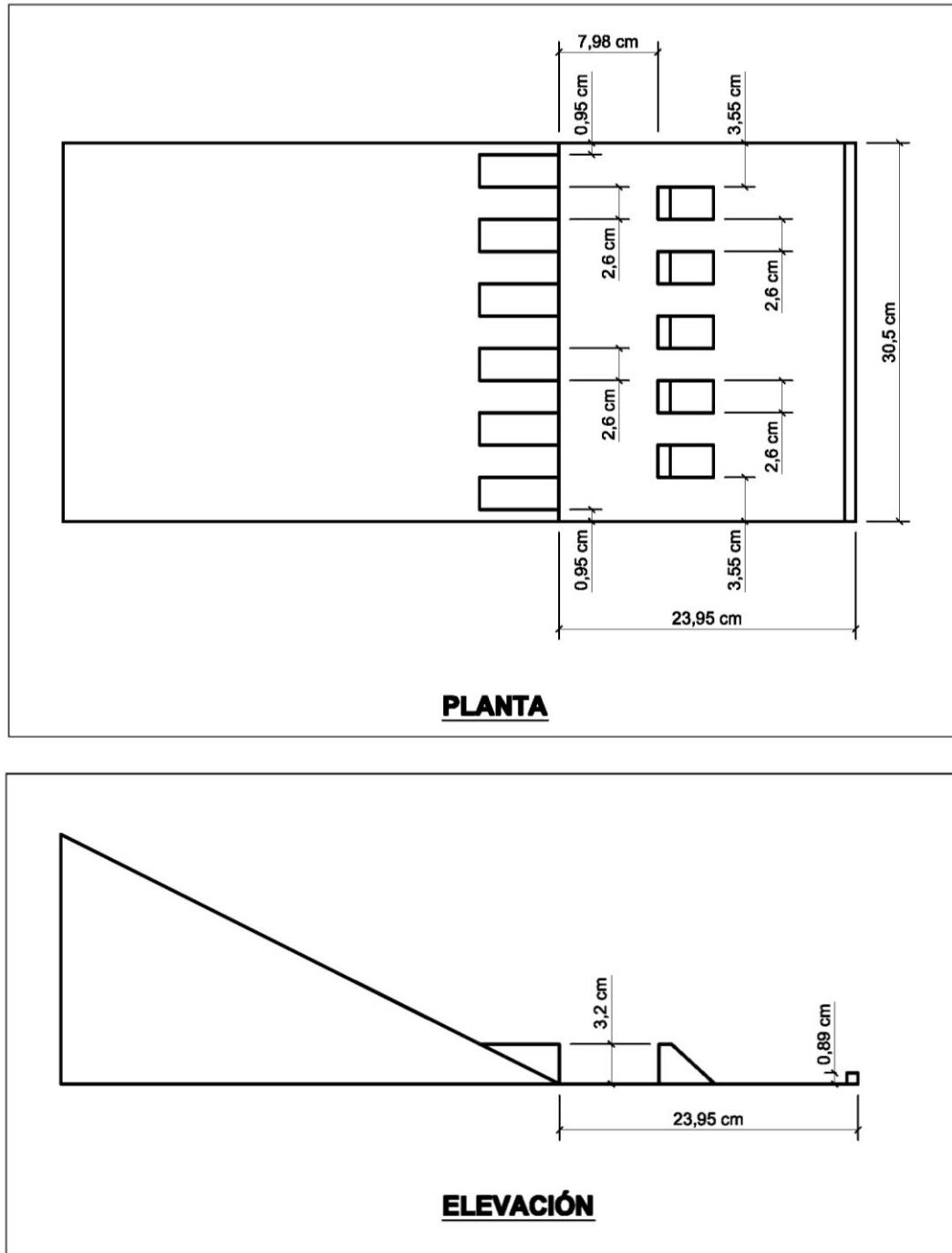
Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

La profundidad de salida de aguas abajo por encima del piso del cuenco disipador para un $F_1 = 3,14$ está dada por:

$$y_2' = \left(1,10 - \frac{F_1^2}{120} \right) y_2$$
$$y_2' = \left(1,10 - \frac{(3,14)^2}{120} \right) \times 12,70 \text{ cm}$$
$$y_2' = 12,93 \text{ cm}$$

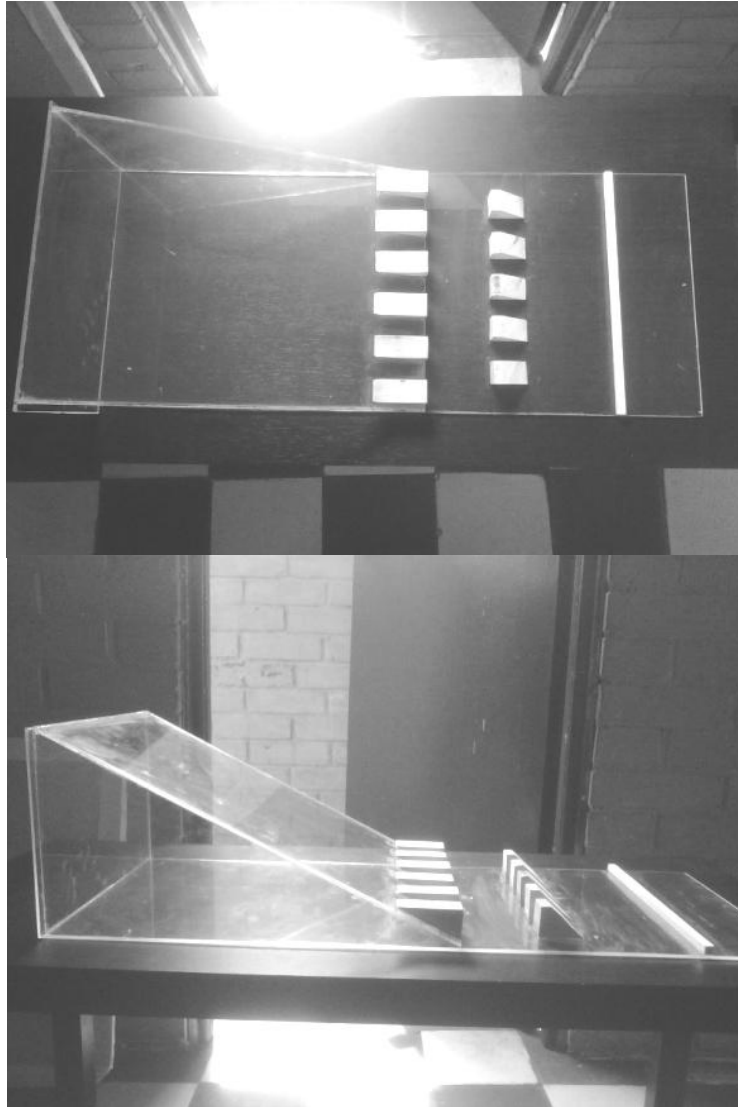
Los muros de salida y muros de aleta no se consideraron en este diseño debido a que el canal es de sección rectangular y no trapezoidal. Ya calculadas las dimensiones para el cuenco SAF, como se observa en la figura 33, se construyó el modelo real del cuenco, como se observa en la figura 34.

Figura 33. Dimensiones de cuenco SAF



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

Figura 34. **Modelo construido de cuenco SAF**



Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Diseño, dimensionamiento y construcción de cuenco USBR II

El cuenco USBR II es utilizado para $F_1 > 4,5$, por lo que observando los resultados de la tabla V, se determina que la rápida, con pendiente 0,9:1, es la correcta a utilizar, pudiendo utilizar los resultados del ensayo 1 o 4. En este caso se tomarán los del ensayo 4, siendo los resultados de éste $F_1 = 4,68$ y $y_1 = 1,6$ centímetros. Es importante tener en cuenta que dichos datos son solamente una base para el diseño y la construcción del cuenco disipador, esto quiere decir que el cuenco no se diseña sólo para dichas magnitudes, sino que dependerá del comportamiento del resalto, cuando se efectúen los ensayos.

Siguiendo las normas de diseño para el cuenco USBR II indicadas en la sección 2.4.2, se tiene el cálculo de las dimensiones:

3.1.3.1. Longitud del cuenco

La longitud del cuenco se calcula con la curva indicada en la figura 19c, donde $F_1 = 4,68$ y para y_2 con la figura 19b y la recta de mínima profundidad de salida se encuentra el tirante 2 para luego calcular la longitud del cuenco:

$$\frac{y_2}{y_1} = 6,1 \rightarrow y_2 = 6,1 \times y_1$$

Cálculo de y_2 :

$$y_2 = 6,1 \times 1,6 \text{ cm}$$

$$y_2 = 9,76 \text{ cm}$$

Cumpliendo con la norma de diseño, donde se recomienda sumarle un 5 por ciento de y_2 a la profundidad secuente (y_2 = profundidad secuente, por ser un resalto estable), queda y_2 de la siguiente manera:

$$5\%y_2 = 0,05 \times 9,76\text{cm} = 0,49 \text{ cm}$$

$$y_2 = 9,76 \text{ cm} + 0,49 \text{ cm}$$

$$y_2 = 10,25 \text{ cm}$$

Cálculo de L_{II} , de la figura 19c:

$$\frac{L_{II}}{y_2} = 3,75 \rightarrow L_{II} = 3,75 \times y_2$$

$$L_{II} = 3,75 \times 10,25 \text{ cm}$$

$$L_{II} = 38,44 \text{ cm}$$

3.1.3.2. Bloques de rápida

Son los bloques que van colocados al final de la rápida, para dichos bloques se detalla y se calculan las dimensiones conforme a las normas de diseño respectivas.

- La altura de los bloques de rápida (h_1) es:

$$h_1 = y_1$$

$$h_1 = 1,6 \text{ cm}$$

- La separación de las paredes laterales y el primer bloque de rápida es:

$$\text{Separación de extremos} = \frac{y_1}{2}$$

$$\text{Separación de extremos} = \frac{1,6 \text{ cm}}{2}$$

$$\text{Separación de extremos} = 0,8 \text{ cm}$$

- El ancho (w_1) y espaciamiento (s_1) son aproximadamente igual a:

$$w_1 = s_1 = y_1$$

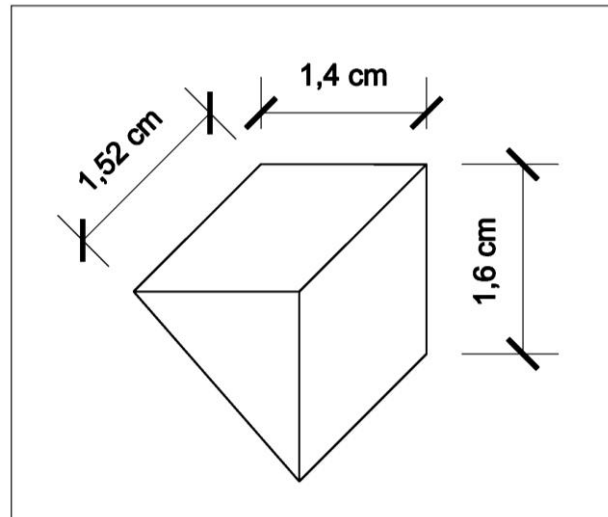
$$w_1 = s_1 = 1,6 \text{ cm}$$

Para saber la cantidad de bloques de rápida que llevará el cuenco se debe tomar en cuenta el ancho del canal, que es de 30,5 centímetros, dividiendo entre los 1,6 centímetros de ancho y espaciamiento de los bloques da un total de 19,06, pero para no tener medios bloques se modificó el ancho y espaciamiento, quedando de la siguiente manera:

- $w_1 = s_1 = 1,52 \text{ cm}$

Con un total de 10 bloques de rápida y 9 espacios entre sí, más la separación de los extremos da el total aproximado del ancho del canal. El largo de los bloques quedó en 1,4 centímetros, considerando la pendiente de la rápida.

Figura 35. **Bloques de rápida de cuenco USBR II**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

3.1.3.3. **Umbral dentado de salida**

El umbral dentado de salida, como su nombre lo indica, va al final del cuenco disipador, es decir; después de los bloques de rápida, ya que este tipo de cuenco no tiene bloques de piso, para dicho umbral se detalla y se calculan las dimensiones conforme a las normas de diseño respectivas.

- La altura del umbral dentado (h_2) es:

$$h_2 = 0,2y_2$$
$$h_2 = 0,2 \times 10,25 \text{ cm}$$
$$h_2 = 2,05 \text{ cm}$$

- El ancho (w_2) y espaciamiento (s_2) máximos son aproximadamente:

$$w_2 = s_2 = 0,15y_2$$

$$w_2 = s_2 = 0,15 \times 10,25 \text{ cm}$$

$$w_2 = s_2 = 1,54 \text{ cm}$$

- Los bordes planos superiores del umbral dentado es:

$$\text{Bordes planos superiores} = 0,02y_2$$

$$\text{Bordes planos superiores} = 0,02 \times 10,25 \text{ cm}$$

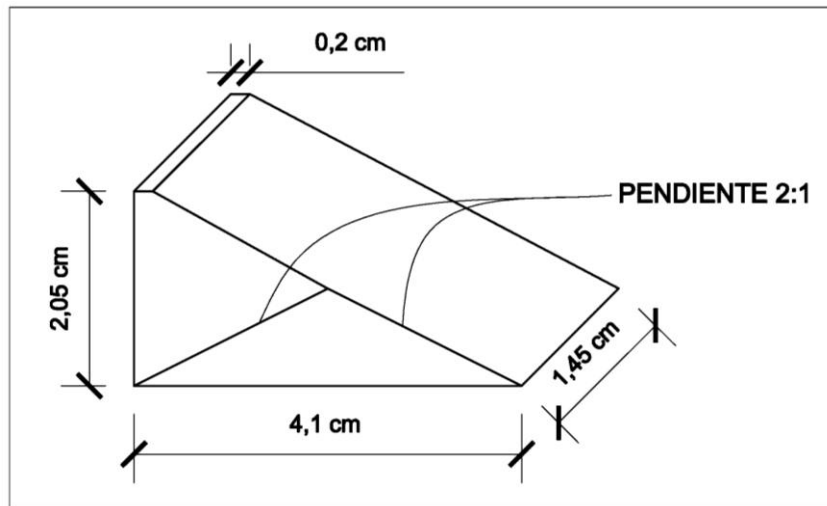
$$\text{Bordes planos superiores} = 0,2 \text{ cm}$$

Para saber la cantidad de bloques del umbral dentado que llevará el cuenco se debe tomar en cuenta el ancho del canal, que es de 30,5 centímetros, dividiendo entre los 1,54 centímetros de ancho y espaciamiento de los bloques da un total de 19,8, pero para no tener medios bloques se modificó el ancho y espaciamiento quedando de la siguiente manera:

- $w_2 = s_2 = 1,45 \text{ cm}$

Con un total de 11 bloques para el umbral dentado y 10 espacios entre sí, da un total aproximado al ancho del canal. Tomar en cuenta las pendientes 2:1 del umbral, como se ve en la figura 36.

Figura 36. **Umbral dentado de salida de cuenco USBR II**

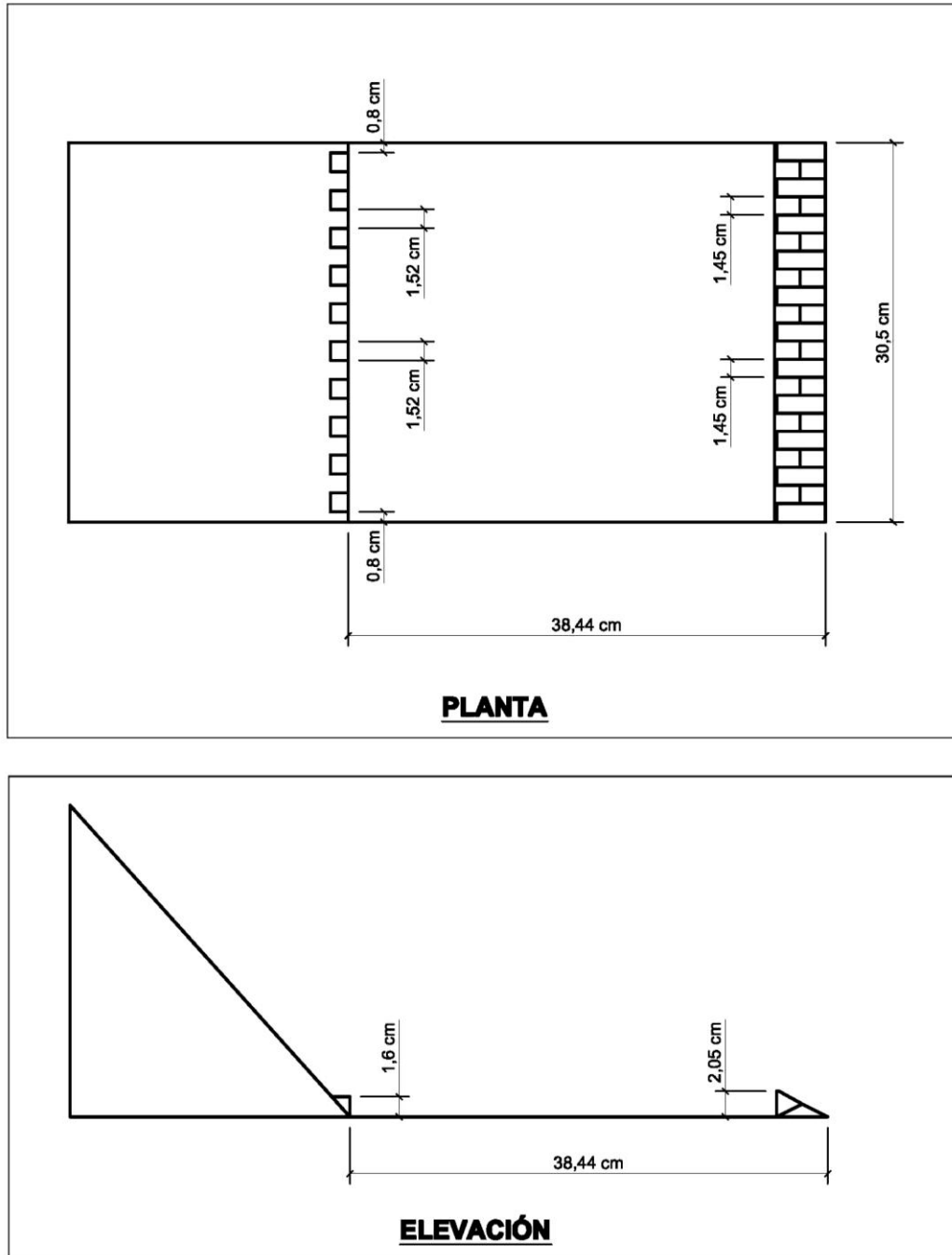


Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

En una norma de diseño se recomienda que la intersección aguda entre la rápida y el cuenco se reemplace por una curva de radio razonable cuando la pendiente de la rápida es 1:1 o mayor, lo cual pasa en este caso, ya que la pendiente de la rápida es de 0,9:1, pero debido a que el comportamiento en los ensayos de la rápida el flujo se adaptó de buena manera en dicha intersección no se consideró la recomendación antes mencionada.

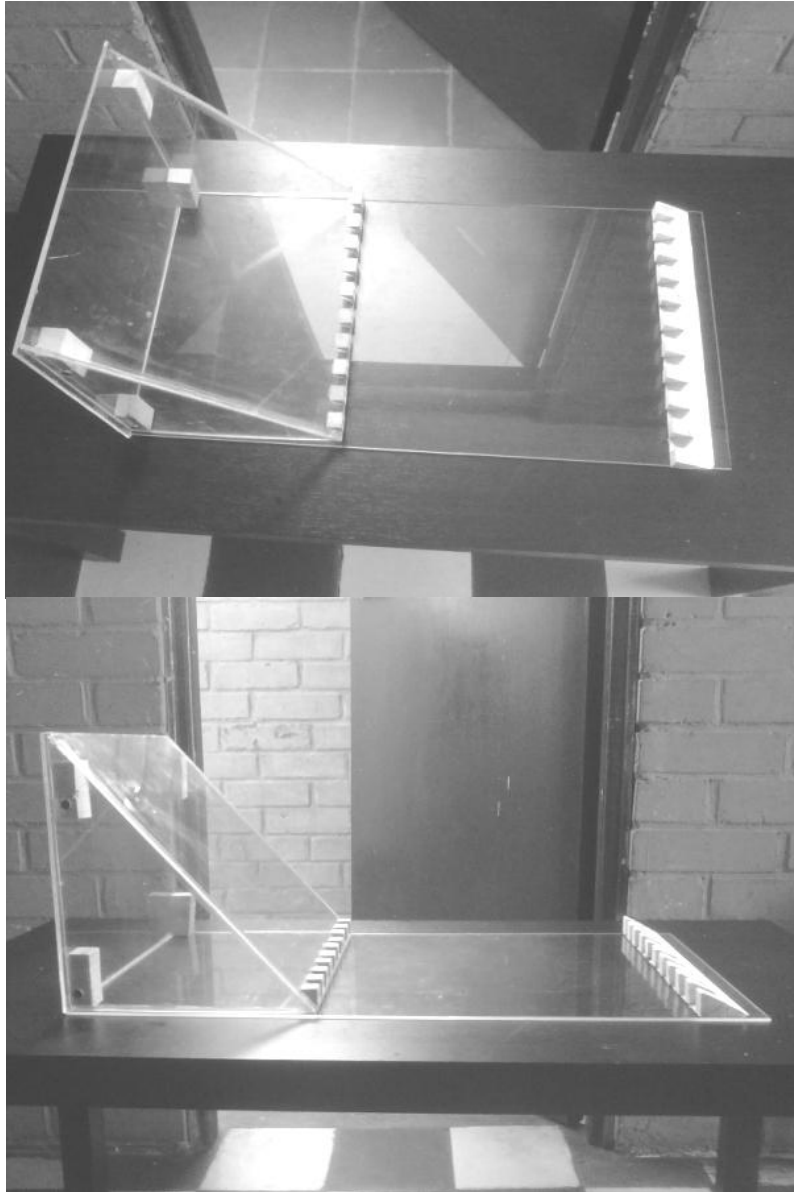
Una vez cumplidas las normas de diseño y habiendo calculado todas las dimensiones del cuenco USBR II, se puede observar en la figura 37 las dimensiones del mismo y posteriormente en la figura 38 el modelo real construido del cuenco.

Figura 37. Dimensiones de cuenco USBR II



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

Figura 38. **Modelo construido de cuenco USBR II**



Fuente: elaboración propia.

3.1.4. Diseño, dimensionamiento y construcción de cuenco USBR III

El cuenco USBR III, al igual que el cuenco USBR II, se utiliza para $F_1 > 4,5$, por lo que la rápida y los resultados de los ensayos a utilizar para el diseño y construcción del cuenco completo serán los mismos, es decir, los del ensayo 4 de la rápida con pendiente 0,9:1, donde $F_1 = 4,68$ y $y_1 = 1,6$ centímetros.

Siguiendo las normas de diseño para el cuenco USBR III indicadas en la sección 2.4.3 se tiene el cálculo de las dimensiones:

3.1.4.1. Longitud del cuenco

La longitud del cuenco se calcula con la curva de la figura 20b, donde $F_1 = 4,68$ y para y_2 se calcula con la ecuación 9, para luego ya teniendo datos, calcular la longitud del cuenco como se detalla y se calcula a continuación:

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

Cálculo de y_2 :

$$y_2 = \frac{1,6 \text{ cm}}{2} \left(\sqrt{8(4,68)^2 + 1} - 1 \right)$$
$$y_2 = 9,82 \text{ cm}$$

Cálculo de L_{III} , de la figura 20b:

$$\frac{L_{III}}{y_2} = 2,28 \rightarrow L_{III} = 2,28 \times y_2$$

$$L_{III} = 2,28 \times 10,25 \text{ cm}$$

$$L_{III} = 22,4 \text{ cm}$$

3.1.4.2. Bloques de rápida

Son los bloques que van colocados al final de la rápida, para dichos bloques se detalla y se calculan las dimensiones conforme a las normas de diseño respectivas.

- La altura de los bloques de rápida (h_1) es igual a:

$$h_1 = y_1$$

$$h_1 = 1,6 \text{ cm}$$

- La separación de los paredes laterales y el primer bloque de rápida es:

$$\text{Separación de extremos} = 0,5y_1$$

$$\text{Separación de extremos} = 0,5 \times 1,6 \text{ cm}$$

$$\text{Separación de extremos} = 0,8 \text{ cm}$$

- El ancho (w_1) y espaciamento (s_1) son aproximadamente igual a:

$$w_1 = s_1 = y_1$$

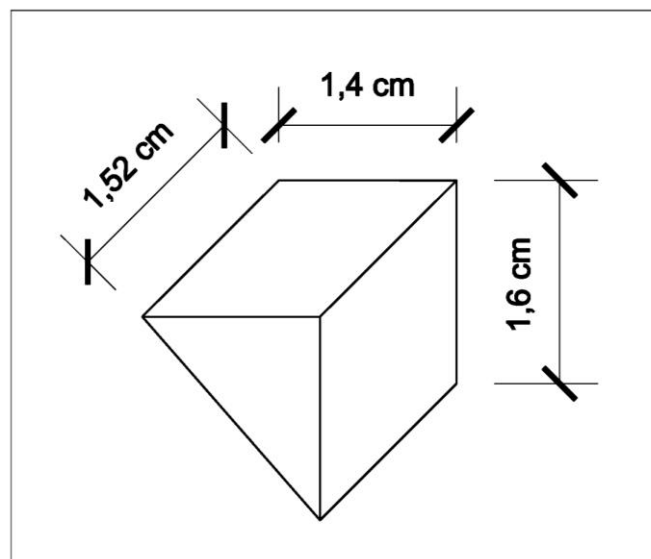
$$w_1 = s_1 = 1,6 \text{ cm}$$

Para saber la cantidad de bloques de rápida que llevara el cuenco se debe tomar en cuenta el ancho del canal, que es de 30,5 centímetros, dividiendo entre los 1,6 centímetros de ancho y espaciamiento de los bloques da un total de 19,06, pero para no tener medios bloques se modificó el ancho y espaciamiento, quedando de la siguiente manera:

- $w_1 = s_1 = 1,52 \text{ cm}$

Con un total de 10 bloques de rápida y 9 espacios entre sí, más la separación de los extremos da el total aproximado del ancho del canal. El largo de los bloques quedó en 1,4 centímetros, considerando la pendiente de la rápida.

Figura 39. **Bloques de rápida de cuenco USBR III**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

3.1.4.3. Bloques de piso

Son los bloques que van colocados después de los bloques de rápida, para dichos bloques se detalla y se calculan las dimensiones conforme a las normas de diseño respectivas.

- La altura de los bloques de piso (h_3) se calcula con la curva de la figura 20c, donde $F_1 = 4,68$ y $y_1 = 1,6$ centímetros:

$$\frac{h_3}{y_1} = 1,4 \rightarrow h_3 = 1,4 \times y_1$$

$$h_3 = 1,4 \times 1,6 \text{ cm}$$

$$h_3 = 2,24 \text{ cm}$$

- La separación de los extremos laterales y el primer bloque de piso es:

$$\text{Separación de extremos} = 0,375h_3$$

$$\text{Separación de extremos} = 0,375 \times 2,24 \text{ cm}$$

$$\text{Separación de extremos} = 0,84 \text{ cm}$$

- El ancho (w_3) y espaciamiento (s_3) de los bloques de piso es:

$$w_3 = s_3 = 0,75h_3$$

$$w_3 = s_3 = 0,75 \times 2,24 \text{ cm}$$

$$w_3 = s_3 = 1,68 \text{ cm}$$

Para saber la cantidad de bloques de piso que llevará el cuenco se toma en cuenta el ancho del canal, que es de 30,5 centímetros, dividiendo entre los 1,68 centímetros de ancho y espaciamiento de los bloques da un total de 18,15,

pero para no tener medios bloques se modificó la separación de las paredes laterales, quedando de la siguiente manera:

- Separación de los extremos = 0,97 cm

Quedando de esta manera un total de 9 bloques de piso y 8 espacios entre cada uno de ellos, más la separación de los extremos da el total del ancho del canal. El largo de los bloques es de 2,8 centímetros, el cual se toma a criterio, ya que no influye de gran manera el comportamiento del resalto.

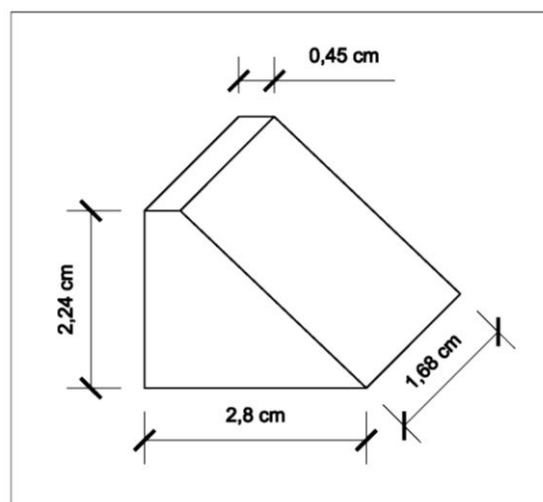
- El borde plano de la parte superior de los bloques de piso es:

$$\text{Bordes planos superiores} = 0,2h_3$$

$$\text{Bordes planos superiores} = 0,2 \times 2,24 \text{ cm}$$

$$\text{Bordes planos superiores} = 0,45 \text{ cm}$$

Figura 40. **Bloques de piso de cuenco USBR III**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

La distancia entre los bloques de rápida y los de piso es:

$$\text{Distancia entre bloques de rápida y de piso} = 0,8y_2$$

$$\text{Distancia entre bloques de rápida y de piso} = 0,8 \times 9,82 \text{ cm}$$

$$\text{Distancia entre bloques de rápida y de piso} = 7,86 \text{ cm}$$

3.1.4.4. Umbral de salida

El umbral de salida, como su nombre lo indica, va al final del cuenco disipador, es decir; después de los bloques de piso, para dicho umbral se detalla y se calculan las dimensiones conforme a las normas de diseño respectivas.

- La altura (h_4) del umbral de salida se calcula con la curva de la figura 20c, donde $F_1 = 4,68$ y $y_1 = 1,6$ centímetros:

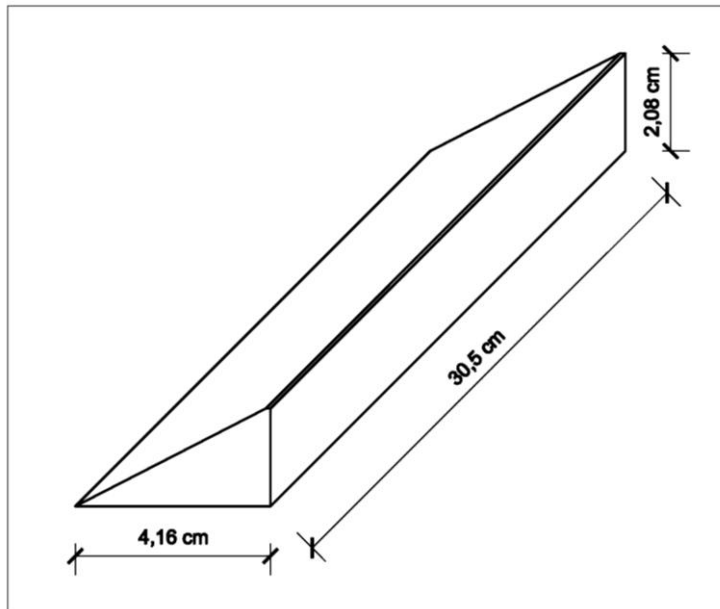
$$\frac{h_4}{y_1} = 1,3 \rightarrow h_4 = 1,3 \times y_1$$

$$h_4 = 1,3 \times 1,6 \text{ cm}$$

$$h_4 = 2,08 \text{ cm}$$

- El ancho del umbral es igual al ancho del canal, que es de 30,5 centímetros y para el largo se consideró la pendiente 2:1 que pide la norma de diseño, quedando el largo de 4,16 centímetros.

Figura 41. **Umbral de salida de cuenco USBR III**

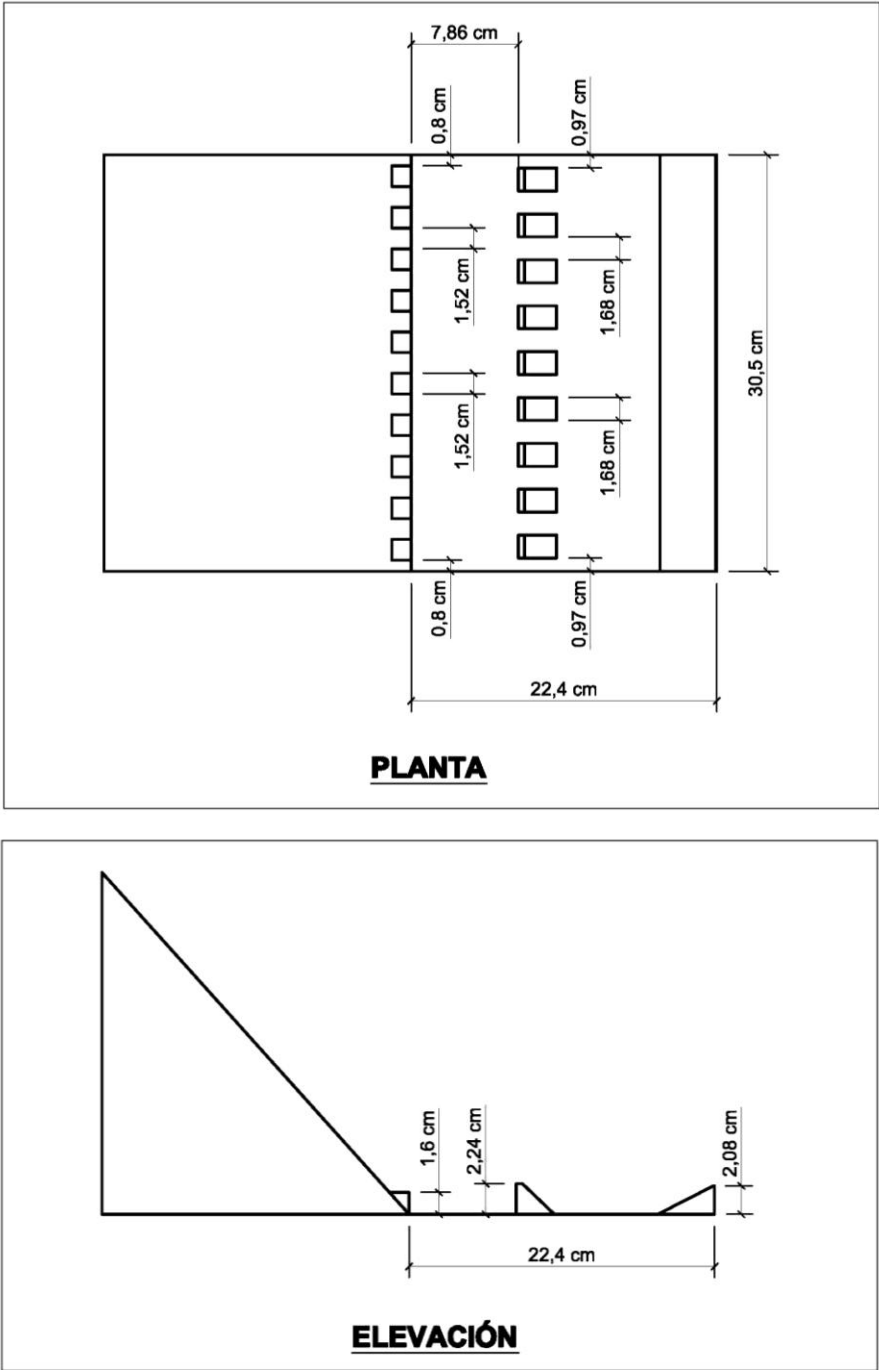


Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

En una norma de diseño, indicada en la sección 2.4.3, al igual que para el cuenco USBR II, para el cuenco USBR III se recomienda que la intersección aguda entre la rápida y el cuenco se reemplace por una curva de radio razonable cuando la pendiente de la rápida es de 45 grados o mayor, lo cual pasa en este caso, ya que la relación de la pendiente de la rápida es de 0,9:1 (48 grados), pero debido a que el comportamiento en los ensayos de la rápida el flujo se adaptó de buena manera en dicha intersección no se consideró la recomendación antes mencionada.

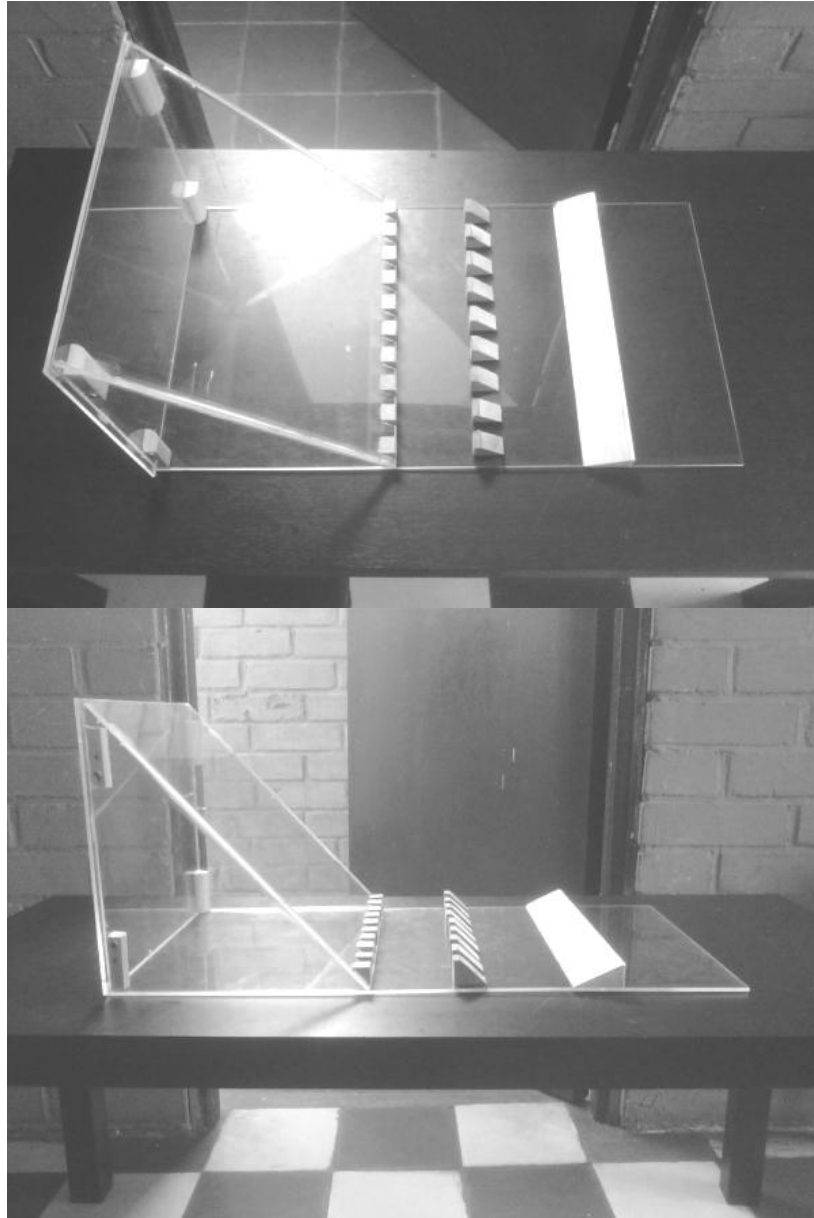
Una vez cumplidas las normas de diseño y habiendo calculado todas las dimensiones para el cuenco USBR III, se observa en la figura 42 las dimensiones del mismo y posteriormente en la figura 43 el modelo real construido del cuenco.

Figura 42. Dimensiones de cuenco USBR III



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

Figura 43. **Modelo construido de cuenco USBR III**



Fuente: elaboración propia.

3.2. Ensayos para la formación y control del resalto hidráulico mediante cuencos disipadores

El resalto hidráulico, al ser un medio de disipación de energía natural para el flujo del agua, es utilizado en diferentes obras de construcción donde sea aplicable, por lo que la idea de hacer del resalto, un resalto más corto, más seguro y más económico en el aspecto constructivo, es una idea muy importante de llevar a cabo. Es allí donde los cuencos disipadores cumplen con dicha función, reduciendo en porcentaje la longitud del resalto y por consiguiente reduciendo también la longitud a construir de la obra y el costo.

De esta manera se realizaron los ensayos para determinar si la reducción de longitud del resalto es como lo dice la teoría, comparando los resultados con los de resaltos que se forman sin la ayuda de los cuencos.

Cada uno de los ensayos se realizó en el canal del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, que además del canal cuenta con un pozo tranquilizador, un tanque calibrado que es utilizado para el aforo volumétrico y la bomba que es la que suministra el agua.

El procedimiento para todos los ensayos es el siguiente:

- Fijar el cuenco disipador al canal, utilizando silicón y cinta para sellar, para evitar las filtraciones en los bordes y que esto pueda afectar en la toma de datos.
- Encender la bomba y suministrar agua al canal hasta llegar a un nivel considerable por encima de la cresta de la rápida.

- Realizar la toma de lecturas de altura sobre la cresta, tirante inicial, tirante de salida y longitud del resalto.
- Realizar 3 aforos volumétricos, midiendo el volumen del depósito y el tiempo de llenado con un cronómetro.

Dicho procedimiento se realiza cada vez que se modifica el suministro de agua, es decir, para cada tirante diferente y caudal.

3.2.1. Ensayos de laboratorio para cuenco SAF

Una vez instalado el cuenco en el canal (figura 44), se procedió a realizar los diferentes ensayos para ver el comportamiento del cuenco y la formación del resalto hidráulico y así poder determinar el funcionamiento del mismo.

Figura 44. **Cuenco SAF instalado en canal del laboratorio**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

En la figura 45 se puede observar el comportamiento del resalto hidráulico con el cuenco SAF, de cada uno de los ensayos:

Figura 45. **Ensayos de laboratorio de cuenco SAF**

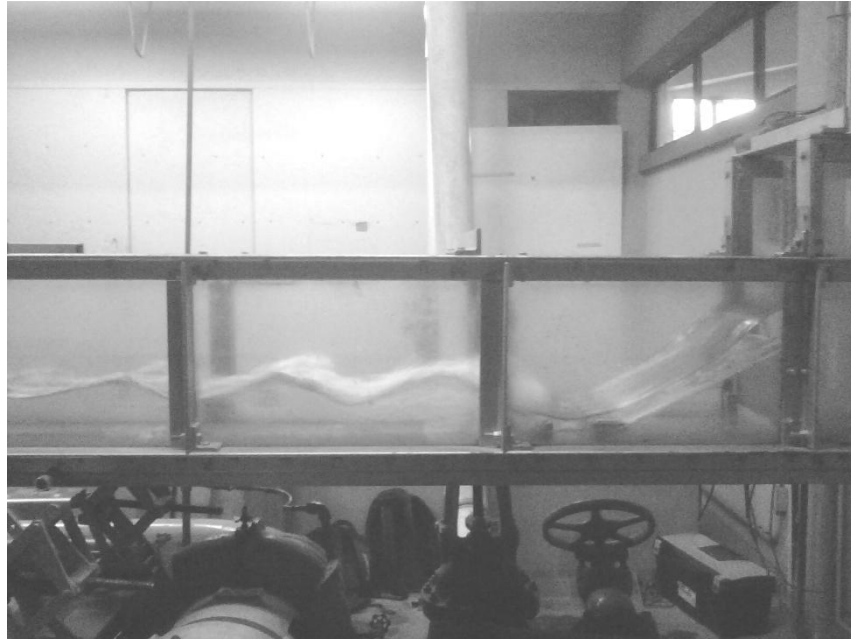


Ensayo 1



Ensayo 2

Continuación de la figura 45.



Ensayo 3



Ensayo 4

Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

En las imágenes anteriores se puede observar cómo los dientes de rápida parten el chorro que entra, para que luego los bloques de piso produzcan un salto. Los datos obtenidos de cada ensayo se detallan en las tablas VI y VII:

Tabla VI. **Caudales obtenidos en ensayos de laboratorio de cuenco SAF**

Ensayo	t1 (s)	V1 (l)	t2 (s)	V2 (l)	t3 (s)	V3 (l)	Q1 = V1/t1 (l/s)	Q2 = V2/t2 (l/s)	Q3 = V3/t3 (l/s)
1	26,41	425,72	26,00	414,63	26,20	420,54	16,12	15,95	16,05
2	27,56	460,64	27,34	457,66	27,50	461,39	16,71	16,74	16,78
3	25,22	458,41	25,57	452,45	28,16	493,58	18,18	17,69	17,53
4	24,06	429,42	23,78	430,90	23,92	430,16	17,85	18,12	17,98

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Datos medidos en ensayos de laboratorio de cuenco SAF**

Ensayo	H0 (cm)	y1 (cm)	y2 (cm)	y2' (cm)	Long. Resalto (cm)
1	7,8	3,1	12,8	10,8	18
2	8,2	3,2	13	10,9	19
3	8,6	3,3	13	11	23
4	9	3,4	13,1	11,2	26

Fuente: elaboración propia.

3.2.1.1. Obtención de resultados

Con los datos obtenidos, se calcula el caudal promedio y se procede a calcular el número de Froude inicial (F_1) con la ecuación 8 que se detalla a continuación, para luego mostrar una iteración de cómo operar en la ecuación:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{Q/A}{\sqrt{gy_1}}$$

Donde:

$$Q = (\text{cm}^3/\text{s})$$

$$A = \text{base del canal por } y_1 (\text{cm}^2)$$

$$g = 981 (\text{cm}/\text{s}^2)$$

$$y_1 = (\text{cm})$$

Primera iteración:

$$F_1 = \frac{\frac{16040 \text{ cm}^3/\text{s}}{30,5 \text{ cm} \times 3,1 \text{ cm}}}{\sqrt{981 \text{ cm}/\text{s}^2 \times 3,1 \text{ cm}}} = 3,08$$

Obteniendo los siguientes datos:

Tabla VIII. **Número de Froude inicial para cuenco SAF**

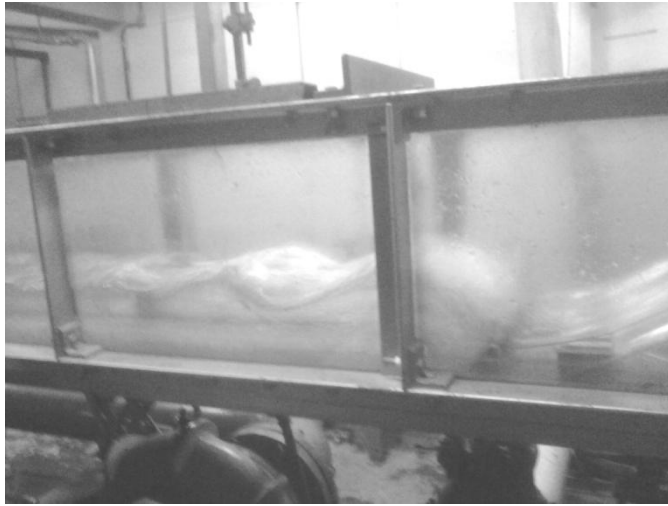
Ensayo	y1 (cm)	Q prom (l/s)	Q prom (cm ³ /s)	A (cm ²)	F1
1	3,1	16,04	16,040	94,55	3,08
2	3,2	16,74	16,740	97,60	3,06
3	3,3	17,80	17,800	100,65	3,11
4	3,4	17,98	17,980	103,70	3

Fuente: elaboración propia.

Los tipos de resalto de la sección 1.3 se clasifican según el número inicial de Froude, de donde se ve que para un F_1 que se encuentra entre 2,5 y 4,5, se

presenta un resalto oscilante, el cual es este caso, ya que F_1 está en dicho rango, por lo que como se ve en la figura 46 si se cumple.

Figura 46. **Resalto oscilante de cuenco SAF**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

3.2.1.2. Longitudes de resaltos sin cuenco SAF

Como se mencionó anteriormente, en la sección 2.4.1, la reducción de la longitud del cuenco y del resalto conseguida por el uso de accesorios diseñados para el mismo es de alrededor del 70 al 90 por ciento. Por lo que con el fin de comparar resultados, se calculan las longitudes del resalto para cada ensayo, con la ayuda de la curva de la figura 8, la cual sirve para calcular longitudes para un resalto normal, es decir, sin cuenco disipador.

- Para el ensayo 1, donde $F_1 = 3,08$ y $y_2 = 12,8$ centímetros, de la curva de la figura 8 se tiene:

$$\frac{L}{y_2} = 5,35 \rightarrow L = 5,35 \times y_2$$

$$L = 5,35 \times 12,8 \text{ cm}$$

$$L = 68,48 \text{ cm}$$

- Para el ensayo 2, donde $F_1 = 3,06$ y $y_2 = 13$ centímetros, de la curva de la figura 8 se tiene:

$$\frac{L}{y_2} = 5,33 \rightarrow L = 5,33 \times y_2$$

$$L = 5,33 \times 13 \text{ cm}$$

$$L = 69,29 \text{ cm}$$

- Para el ensayo 3, donde $F_1 = 3,11$ y $y_2 = 13$ centímetros, de la curva de la figura 8 se tiene:

$$\frac{L}{y_2} = 5,38 \rightarrow L = 5,38 \times y_2$$

$$L = 5,38 \times 13 \text{ cm}$$

$$L = 69,94 \text{ cm}$$

- Para el ensayo 4, donde $F_1 = 3$ y $y_2 = 13,1$ centímetros, de la curva de la figura 8 se tiene:

$$\frac{L}{y_2} = 5,31 \rightarrow L = 5,31 \times y_2$$

$$L = 5,31 \times 13,1 \text{ cm}$$

$$L = 69,56 \text{ cm}$$

3.2.1.3. Comparación de resultados

Una vez calculadas las longitudes de resaltos sin cuencos se puede calcular el porcentaje de reducción de las longitudes de resaltos con cuencos, quedando todo resumido en la tabla IX:

Tabla IX. **Porcentaje de reducción de longitud del resalto para cuenco SAF**

Ensayo	y1 (cm)	y2 (cm)	F1	Long. Real de Resalto (cm)	Long. de Resalto sin cuenco (cm)	% de reducción
1	3,1	12,8	3,08	18	68,48	73,7
2	3,2	13	3,06	19	69,29	72,6
3	3,3	13	3,11	23	69,94	67,1
4	3,4	13,1	3	26	69,56	62,6

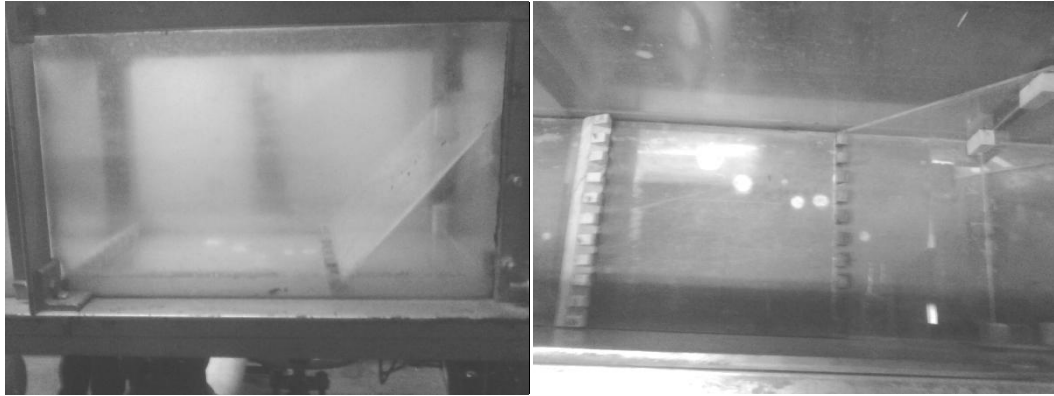
Fuente: elaboración propia.

Al observar los porcentajes de reducción de la longitud del resalto se puede concluir que los ensayos 1 y 2 están en el rango mencionado anteriormente, es decir, entre 70 y 90 por ciento, mientras que los ensayos 3 y 4 están por debajo, pero muy cercanos. Tomando como aceptable el funcionamiento del cuenco SAF. Cabe mencionar que se deben considerar los errores que pueden existir en la toma de datos, ya que no siempre son exactos.

3.2.2. Ensayos de laboratorio para cuenco USBR II

El procedimiento para los ensayos es el mismo descrito anteriormente. En la figura 47 se puede observar el cuenco ya instalado en el canal, listo para realizar los ensayos y ver el comportamiento del resalto hidráulico con la utilización del cuenco USBR II.

Figura 47. **Cuenco USBR II instalado en canal del laboratorio**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

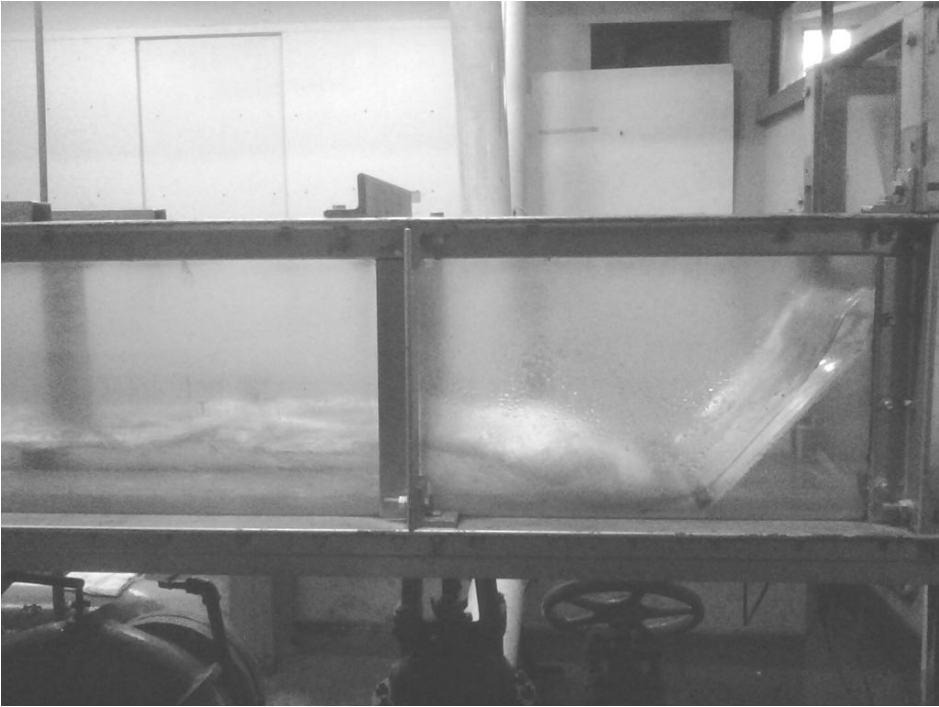
En la figura 48 se puede observar como se comporta y se forma el resalto hidráulico con el cuenco USBR II en cada uno de los ensayos:

Figura 48. **Ensayos de laboratorio de cuenco USBR II**

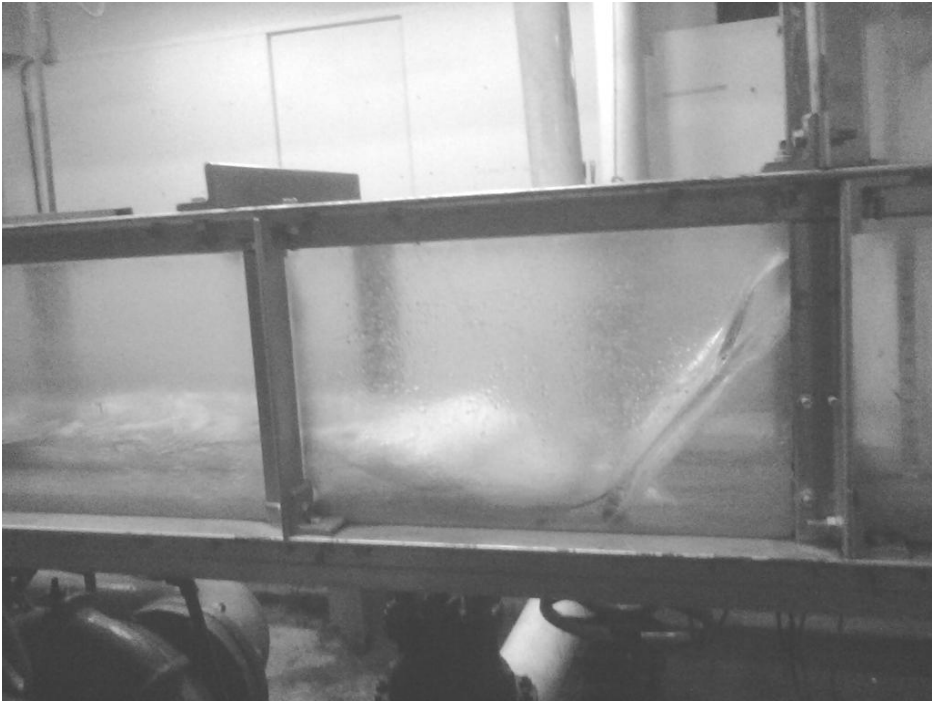


Ensayo 1

Continuación de la figura 48.



Ensayo 2



Ensayo 3

Continuación de la figura 48.



Ensayo 4

Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

En las imágenes anteriores se observa como se forma un resalto estable, bien definido y como el resalto se va corriendo aguas abajo al aumentar el caudal. Los datos obtenidos de cada ensayo se detallan en las tablas X y XI:

Tabla X. **Caudales obtenidos en ensayos de laboratorio de cuenco USBR II**

Ensayo	t1 (s)	V1 (l)	t2 (s)	V2 (l)	t3 (s)	V3 (l)	Q1 = V1/t1 (l/s)	Q2 = V2/t2 (l/s)	Q3 = V3/t3 (l/s)
1	56,87	447,98	55,69	439,80	57,50	454,68	7,88	7,90	7,91
2	45,19	427,20	48,03	456,91	48,31	459,15	9,45	9,51	9,50
3	40,97	451,70	41,93	463,63	41,40	457,66	11,03	11,06	11,05
4	36,66	443,52	36,19	442,03	35,91	437,58	12,10	12,21	12,19

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Datos medidos en ensayos de laboratorio de cuenco USBR II**

Ensayo	H0 (cm)	y1 (cm)	y2 (cm)	Long. Resalto (cm)
1	5	1,4	8	28
2	5,5	1,6	9	30
3	6	2	9	28
4	6,5	2,1	9,5	23

Fuente: elaboración propia.

3.2.2.1. Obtención de resultados

Con los datos obtenidos, se calcula el caudal promedio y se procede a calcular el número de Froude inicial (F_1) con la ecuación 8 que se detalla a continuación, para luego mostrar una iteración de cómo operar en la ecuación:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{Q/A}{\sqrt{gy_1}}$$

Donde:

$$Q = (\text{cm}^3/\text{s})$$

$$A = \text{base del canal por } y_1 (\text{cm}^2)$$

$$g = 981 (\text{cm}/\text{s}^2)$$

$$y_1 = (\text{cm})$$

Primera iteración:

$$F_1 = \frac{7890 \text{ cm}^3/\text{s}}{\sqrt{\frac{30,5 \text{ cm} \times 1,4 \text{ cm}}{981 \text{ cm}/\text{s}^2 \times 1,4 \text{ cm}}}} = 4,99$$

Obteniendo los siguientes datos:

Tabla XII. **Número de Froude inicial para cuenco USBR II**

Ensayo	y1 (cm)	Q prom (l/s)	Q prom (cm ³ /s)	A (cm ²)	F1
1	1,4	7,89	7,890	42,70	4,99
2	1,6	9,49	9,490	48,80	4,91
3	2	11,05	11,050	61,00	4,09
4	2,1	12,17	12,170	64,05	4,19

Fuente: elaboración propia.

El cuenco USBR II, se utiliza para $F_1 > 4,5$, por lo que los ensayos 3 y 4 no cumplen, sin embargo, se seguirán tomando en cuenta para su discusión al final. Según la sección 1.3 el resalto que se formó sería un resalto estable, lo cual se observa en la figura 49, del ensayo 1.

Figura 49. **Resalto estable de cuenco USBR II**



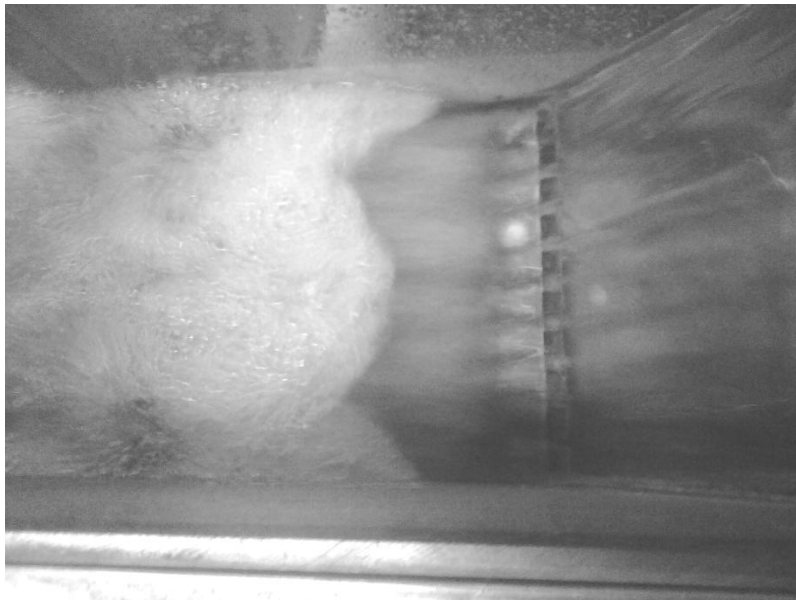
Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

En la figura 50 se observa como se genera la turbulencia en el resalto y como se va corriendo aguas abajo, conforme aumenta el caudal.

Figura 50. **Turbulencia en el resalto de cuenco USBR II**

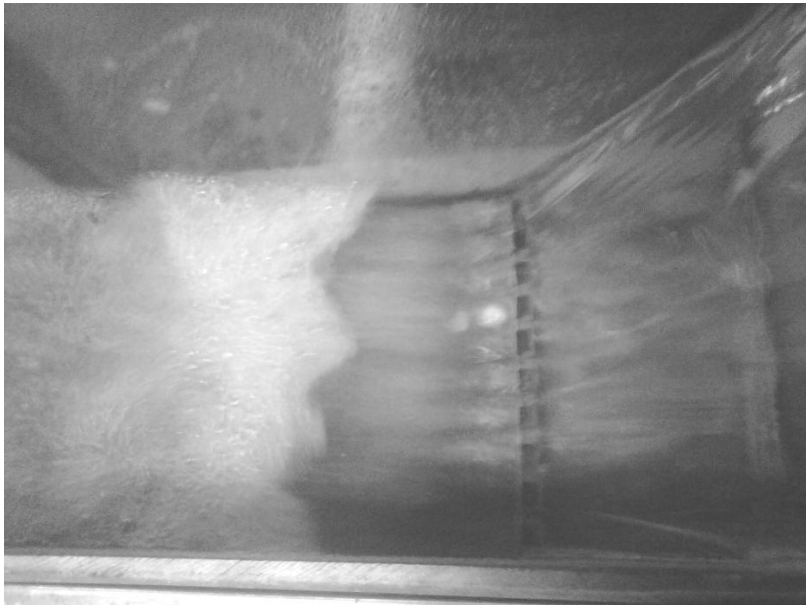


Ensayo 1

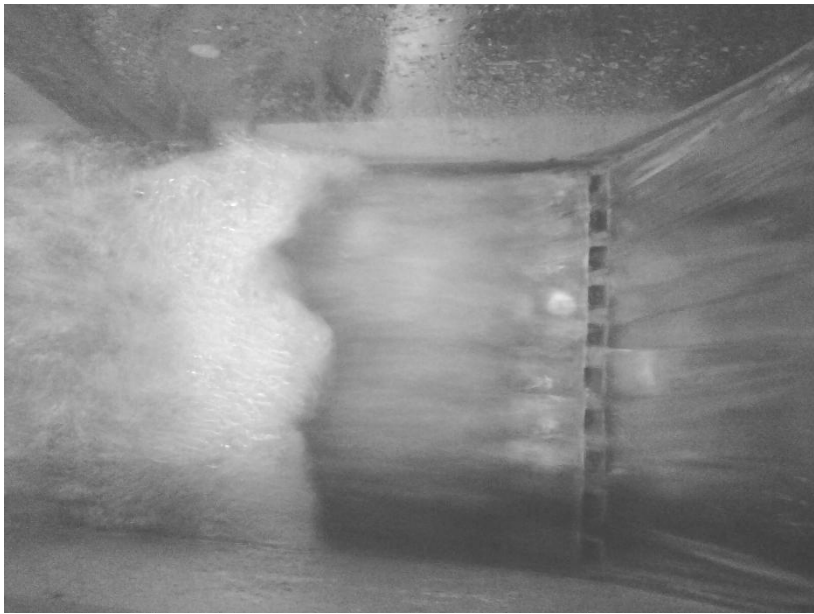


Ensayo 2

Continuación de la figura 50.



Ensayo 3



Ensayo 4

Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

3.2.2.2. Longitudes de resaltos sin cuenco USBR II

La reducción de la longitud del resalto para el cuenco USBR II, según la sección 2.4.2 es de alrededor del 33 por ciento. Por lo que con el fin de comparar resultados, se calculan las longitudes del resalto para cada ensayo, con la ayuda de la curva de la figura 8, la cual sirve para calcular longitudes para un resalto normal, es decir, sin cuenco disipador.

- Para el ensayo 1, donde $F_1 = 4,99$ y $y_2 = 8$ centímetros, de la curva de la figura 8 se tiene:

$$\frac{L}{y_2} = 6 \rightarrow L = 6 \times y_2$$

$$L = 6 \times 8 \text{ cm}$$

$$L = 48 \text{ cm}$$

- Para el ensayo 2, donde $F_1 = 4,91$ y $y_2 = 9$ centímetros, de la curva de la figura 8 se tiene:

$$\frac{L}{y_2} = 5,97 \rightarrow L = 5,97 \times y_2$$

$$L = 5,97 \times 9 \text{ cm}$$

$$L = 53,73 \text{ cm}$$

- Para el ensayo 3, donde $F_1 = 4,09$ y $y_2 = 9$ centímetros, de la curva de la figura 8 se tiene:

$$\frac{L}{y_2} = 5,84 \rightarrow L = 5,84 \times y_2$$

$$L = 5,84 \times 9 \text{ cm}$$

$$L = 52,56 \text{ cm}$$

- Para el ensayo 4, donde $F_1 = 4,19$ y $y_2 = 9,5$ centímetros, de la curva de la figura 8 se tiene:

$$\frac{L}{y_2} = 5,88 \rightarrow L = 5,88 \times y_2$$

$$L = 5,88 \times 9,5 \text{ cm}$$

$$L = 55,86 \text{ cm}$$

3.2.2.3. Comparación de resultados

Una vez calculadas las longitudes de resaltos sin cuenco se puede calcular el porcentaje de reducción de las longitudes de resaltos con cuenco, quedando todo resumido en la tabla XIII:

Tabla XIII. **Porcentaje de reducción de longitud del resalto para cuenco USBR II**

Ensayo	y1 (cm)	y2 (cm)	F1	Long. Real de Resalto (cm)	Long. de Resalto sin cuenco(cm)	% de reducción
1	1,4	8	4,99	28	48	41,7
2	1,6	9	4,91	30	53,73	44,2
3	2	9	4,09	28	52,56	46,7
4	2,1	9,5	4,19	23	55,86	58,8

Fuente: elaboración propia.

Al tener los resultados del porcentaje de reducción del resalto con el cuenco USBR II, se observa que se acercan al 33 por ciento que es el

porcentaje que dice la teoría. Considerando que para que la longitud del resalto del ensayo 1 diera los 33 por ciento de reducción, tendría que haber medido aproximadamente 32 centímetros (4 centímetros de diferencia, respecto a las 28 centímetros que midió el resalto), lo cual es relativamente poco, por lo que se toma como aceptable el funcionamiento del cuenco USBR II, tomando en consideración los posibles errores en las medidas y las diferentes fallas que puedan darse a la hora de la lectura de datos y en las dimensiones del modelo construido.

En cuanto a los ensayos 3 y 4, que como se indicó anteriormente, no cumplían con el rango del número de Froude inicial, se refleja en los resultados, siendo estos dos los más lejanos al porcentaje de reducción de la longitud del resalto.

3.2.3. Ensayos de laboratorio para cuenco USBR III

El procedimiento para los ensayos es el mismo descrito anteriormente para los demás cuencos. En la figura 51 se puede observar el cuenco ya instalado en el canal, preparado para realizar los ensayos y ver el comportamiento del resalto hidráulico con la utilización del cuenco USBR III.

Figura 51. **Cuenco USBR III instalado en canal del laboratorio**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

En la figura 52 se puede observar como se comporta y se forma el resalto hidráulico con el cuenco USBR III, en cada uno de los ensayos:

Figura 52. **Ensayos de laboratorio de cuenco USBR III**

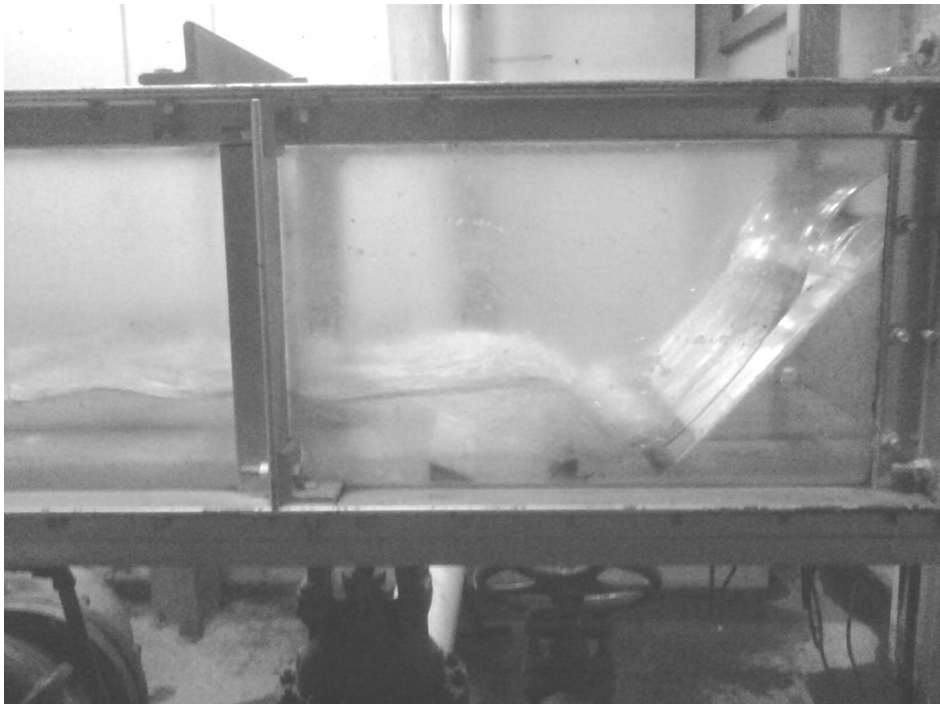


Ensayo 1

Continuación de la figura 52.



Ensayo 2



Ensayo 3

Continuación de la figura 52.



Ensayo 4

Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

En las imágenes de la figura 52 se observa como se forma el resalto que va cambiando conforme aumenta el caudal y los tirantes, también se puede observar como los bloques de piso provocan el salto. Los datos obtenidos de cada ensayo se detallan en las tablas XIV y XV:

Tabla XIV. **Caudales obtenidos en ensayos de laboratorio de cuenco USBR III**

Ensayo	t1 (s)	V1 (l)	t2 (s)	V2 (l)	t3 (s)	V3 (l)	Q1 = V1/t1 (l/s)	Q2 = V2/t2 (l/s)	Q3 = V3/t3 (l/s)
1	70,41	452,45	70,00	451,70	70,84	453,93	6,43	6,45	6,41
2	52,41	463,63	51,41	450,21	54,09	474,84	8,85	8,76	8,78
3	41,38	438,32	43,41	463,63	44,53	468,11	10,59	10,68	10,51
4	38,10	485,32	37,41	490,57	37,19	479,33	12,74	13,11	12,89

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Datos medidos en ensayos de laboratorio de cuenco USBR III**

Ensayo	H0 (cm)	y1 (cm)	y2 (cm)	Long. Resalto (cm)
1	4	1,3	8,5	18
2	5	1,6	9	21
3	6	1,7	10	22
4	6,5	2	10,5	29

Fuente: elaboración propia.

3.2.3.1. Obtención de resultados

Con los datos obtenidos, se calcula el caudal promedio y se procede a calcular el número de Froude inicial (F_1) con la ecuación 8 que se detalla a continuación, para luego mostrar una iteración de cómo operar en la ecuación:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{Q/A}{\sqrt{gy_1}}$$

Donde:

$$Q = (\text{cm}^3/\text{s})$$

$$A = \text{base del canal por } y_1 (\text{cm}^2)$$

$$g = 981 (\text{cm}/\text{s}^2)$$

$$y_1 = (\text{cm})$$

Primera iteración:

$$F_1 = \frac{6430 \text{ cm}^3/\text{s}}{\sqrt{981 \text{ cm}/\text{s}^2 \times 1,3 \text{ cm}}} = 4,54$$

Obteniendo los siguientes datos:

Tabla XVI. **Número de Froude inicial para cuenco USBR III**

Ensayo	y1 (cm)	Q prom (l/s)	Q prom (cm ³ /s)	A (cm ²)	F1
1	1,3	6,43	6,430	39,65	4,54
2	1,6	8,79	8,790	48,80	4,55
3	1,7	10,60	10,600	51,85	5,01
4	2	12,91	12,910	61,00	4,78

Fuente: elaboración propia.

El cuenco USBR III, se utiliza para $F_1 > 4,5$, por lo que todos los ensayos cumplen con esta norma de diseño. Según la sección 1.3 el resalto que se formó sería un resalto estable, lo cual se observa en la figura 53 del ensayo 3.

Figura 53. **Resalto estable de cuenco USBR III**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

En la figura 54 se observa como se comporta el resalto dentro del canal y como se va generando más turbulencia con el aumento del caudal.

Figura 54. **Turbulencia en el resalto de cuenco USBR III**

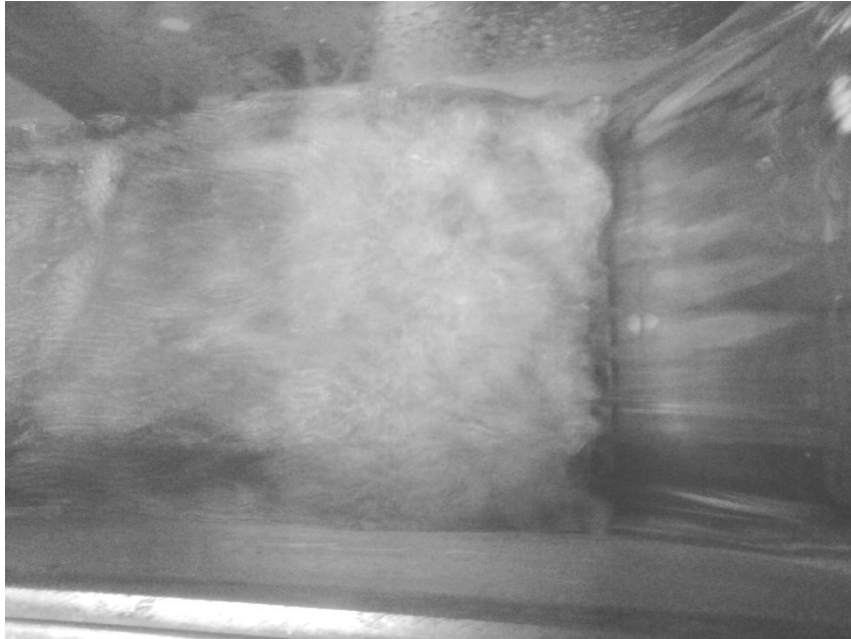


Ensayo 1



Ensayo 2

Continuación de la figura 54.



Ensayo 3



Ensayo 4

Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

3.2.3.2. Longitudes de resaltos sin cuenco USBR III

La reducción de la longitud del resalto para el cuenco USBR III, según la sección 2.4.3 es de alrededor del 60 por ciento. Por lo que con el fin de comparar resultados se calculan las longitudes del resalto para cada ensayo, con la ayuda de la curva de la figura 8, la cual sirve para calcular longitudes para un resalto normal, es decir, sin cuenco disipador.

- Para el ensayo 1, donde $F_1 = 4,54$ y $y_2 = 8,5$ centímetros, de la curva de la figura 8 se tiene:

$$\frac{L}{y_2} = 5,92 \rightarrow L = 5,92 \times y_2$$

$$L = 5,92 \times 8,5 \text{ cm}$$

$$L = 50,32 \text{ cm}$$

- Para el ensayo 2, donde $F_1 = 4,55$ y $y_2 = 9$ centímetros, de la curva de la figura 8 se tiene:

$$\frac{L}{y_2} = 5,93 \rightarrow L = 5,93 \times y_2$$

$$L = 5,93 \times 9 \text{ cm}$$

$$L = 53,37 \text{ cm}$$

- Para el ensayo 3, donde $F_1 = 5,01$ y $y_2 = 10$ centímetros, de la curva de la figura 8 se tiene:

$$\frac{L}{y_2} = 6,05 \rightarrow L = 6,05 \times y_2$$

$$L = 6,05 \times 10 \text{ cm}$$

$$L = 60,50 \text{ cm}$$

- Para el ensayo 4, donde $F_1 = 4,78$ y $y_2 = 10,5$ centímetros, de la curva de la figura 8 se tiene:

$$\frac{L}{y_2} = 5,95 \rightarrow L = 5,95 \times y_2$$

$$L = 5,95 \times 10,5 \text{ cm}$$

$$L = 62,48 \text{ cm}$$

3.2.3.3. Comparación de resultados

Una vez calculadas las longitudes de resaltos sin cuenco se puede calcular el porcentaje de reducción de las longitudes de resaltos con cuenco, obteniendo los resultados indicados en la tabla XVII:

Tabla XVII. **Porcentaje de reducción de longitud del resalto para cuenco USBR III**

Ensayo	y1 (cm)	y2 (cm)	F1	Long. Real de Resalto (cm)	Long. de Resalto sin cuenco(cm)	% de reducción
1	1,3	8,5	4,54	18	50,32	64,2
2	1,6	9	4,55	21	53,37	60,7
3	1,7	10	5,01	22	60,5	63,6
4	2	10,5	4,78	29	62,48	53,6

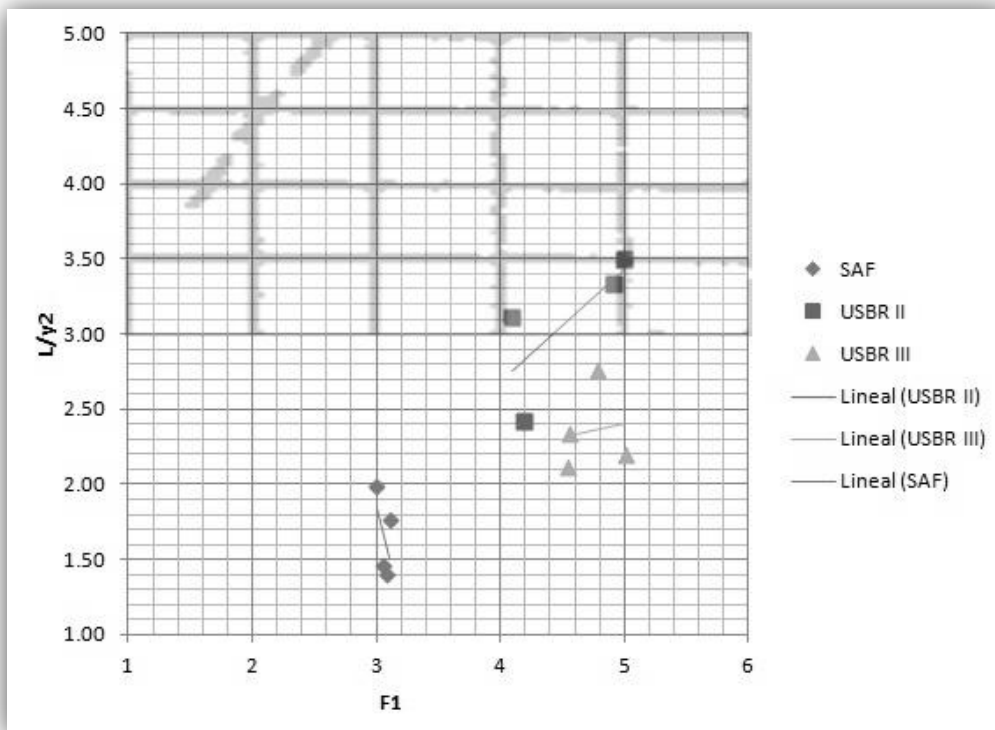
Fuente: elaboración propia.

En los resultados se puede ver como el porcentaje de reducción de la longitud del resalto con cuenco, respecto a la longitud del resalto sin cuenco, se

aproxima al 60 por ciento que dice la teoría. De esta manera se comprueba la teoría con la práctica, tomando como aceptable el funcionamiento del cuenco USBR III, considerando siempre los errores en la toma de datos en la práctica y por consiguiente la inexactitud de los resultados.

En la figura 55 se pueden ver graficados los resultados de las longitudes de los resaltos obtenidas con los cuencos en relación al tirante mayor, contra el número de Froude 1. Mientras que de fondo está un segmento de la figura 8, a fin de comparar los resultados en cuanto a longitudes de resalto, pudiéndose notar la disminución en la relación de las longitudes y el tirante 2.

Figura 55. **Gráfica de resultados obtenidos L/y_2 vs. F_1**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. La construcción de cada uno de los cuencos disipadores fue de diferentes dimensiones y accesorios, dependiendo de las normas de diseño para los mismos, influyendo de esta manera el comportamiento del resalto hidráulico.
2. La reducción de longitud real del resalto para el cuenco SAF fue entre el 62 y el 74 por ciento en comparación del 70 al 90 por ciento según las normas, lo cual es aceptable, tomando en cuenta los posibles errores en las medidas y la inexactitud del modelo construido, debido a sus pequeñas dimensiones. La reducción de longitud real del resalto para el cuenco USBR II fue entre el 41 y el 44 por ciento en comparación del 33 por ciento según las normas, siendo éste también aceptable debido a lo mencionado anteriormente. Y para el cuenco USBR III la reducción de longitud real del resalto fue entre el 54 y el 64 por ciento, en comparación del 60 por ciento según las normas. Comprobando de esta manera la práctica con lo que indica la teoría.
3. La utilización de cuencos disipadores para la creación y control del resalto hidráulico es una manera muy efectiva de reducir la longitud del mismo, porque reduce costos en la construcción y el resalto está controlado.

4. La elección que se haga en cuanto a tipo de cuenco a utilizar va a depender de las condiciones del flujo, como por ejemplo el caudal y tirantes. Esto lo va a definir la pendiente de la rápida, que luego de estudios se determina cual es la adecuada para utilizar en el proyecto de disipación de energía, ayudando así a evitar la socavación aguas abajo, que es para lo que mayormente se utiliza.
5. La elección de la rápida es muy importante, ya que es la pendiente y las dimensiones de la misma las que determinarán el comportamiento del flujo supercrítico y por consiguiente la elección del tipo de cuenco a utilizar.
6. En cada uno de los ensayos se pudo observar como el resalto iba cambiando conforme aumentaba el caudal. Formándose resaltos oscilantes para el cuenco SAF y resaltos estables para los cuencos USBR II y III. Esto se debió al número de Froude para cada resalto en el que existen rangos para la clasificación de los tipos del mismo, lo cual sí se cumplió en los ensayos de laboratorio.
7. La utilización de los cuencos disipadores en el diseño de otras obras hidráulicas es muy importante, ya que permite complementar el funcionamiento de dichas obras, disipando energía, evitando así socavamientos y flujos con velocidades muy altas.

RECOMENDACIONES

1. Antes de realizar cualquier diseño y construcción de cuencos disipadores se deben realizar estudios del comportamiento del flujo a efecto de obtener la información pertinente para el diseño y posteriormente la construcción del mismo.
2. En la toma de datos en los ensayos es necesario esperar a que se estabilice el flujo, para así obtener medidas lo más precisas posibles.
3. Es importante cumplir con cada norma de diseño para los cuencos disipadores, para que el comportamiento del resalto sea lo mejor posible y como es esperado. Ya que de no ser así la eficiencia de los mismos puede bajar en una cantidad considerable.
4. La elección del cuenco disipador se debe hacer dependiendo de los requerimientos que se tengan y de las condiciones del flujo.
5. La manera correcta de colocar los cuencos disipadores en el canal es evitando filtraciones de agua en los lados laterales y por debajo, ya que esto podría perjudicar en el comportamiento del resalto.
6. Dar a conocer los resultados de esta investigación a los estudiantes del curso de Hidráulica e Hidráulica de Canales, ya que ayudará en su aprendizaje y comprensión de los temas que se abordan.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bureau of Reclamation, *Design of small canal structures*. U.S. Department of the Interior, Denver, Colorado, 1978. 435 p.
2. CHOW, Ven T. *Hidráulica de canales abiertos*. Inglaterra: McGraw-Hill, 1994. Traducción por Juan Saldarriaga, Universidad de Newcastle upon Tyne. 667 p.
3. FRENCH, Richard H. *Hidráulica de canales abiertos*. México: McGraw-Hill, 1993. 724 p.
4. LÓPEZ ANDRÉS, Lázaro. *Manual de hidráulica*. España: Universidad de Alicante, 2004. 414 p.
5. MATTOS RUEDAS, Rogel. *Pequeñas obras hidráulicas*. Uruguay: UNESCO, 1998. 246 p.
6. PETERKA, A. J. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Estados Unidos: USBR, 1984. 222 p.
7. VILLÓN B., Máximo. *Hidráulica de canales*. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1995. 487 p.

