



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

**ESTUDIO DE LA FUERZA ESPECÍFICA, ENERGÍA ESPECÍFICA Y  
FLUJO CRÍTICO EN CANALES ABIERTOS**

**Benito Antonio Baca Méndez**

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE LA FUERZA ESPECÍFICA, ENERGÍA ESPECÍFICA Y  
FLUJO CRÍTICO EN CANALES ABIERTOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**BENITO ANTONIO BACA MÉNDEZ**

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordóñez Hernández
EXAMINADOR	Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Portillo España
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **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:

### **ESTUDIO DE LA FUERZA ESPECÍFICA, ENERGÍA ESPECÍFICA Y FLUJO CRÍTICO EN CANALES ABIERTOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 3 de noviembre de 2017.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above the printed name.

**Benito Antonio Baca Méndez**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 14 de Mayo de 2019

Doctor en Ciencias  
Luis Manuel Sandoval Mendoza  
Jefe del Departamento de Hidráulica  
Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Benito Antonio Baca Méndez, quien se identifica con Registro Académico 2014-03494 CUI No. 2705 91036 0101, titulado **ESTUDIO DE LA FUERZA ESPECÍFICA, ENERGÍA ESPECÍFICA Y FLUJO CRÍTICO EN CANALES ABIERTOS**, y haber hecho las correcciones necesarias al mismo, lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.

*"ID y Enseñad a Todos"*

**LUIS M. SANDOVAL MENDOZA**  
**INGENIERO CIVIL**  
**COLEGIADO 6496**

Dr C Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza  
Colegiado No. 6496  
Docente Departamento de Hidráulica



Guatemala, 21 de Mayo de 2019

Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero

Le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado **“ESTUDIO DE LA FUERZA ESPECÍFICA, ENERGÍA ESPECÍFICA Y FLUJO CRÍTICO EN CANALES ABIERTOS”**, desarrollado por el estudiante de ingeniería civil Benito Antonio Baca Méndez, quien contó con la asesoría del ingeniero Luis Manuel Sandoval Mendoza.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y habiendo cumplido con los objetivos doy mi aprobación al mismo, solicitando darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me despido atentamente.



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
HIDRAULICA  
USAC

Dr C. Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza  
Jefe del Departamento de Hidráulica





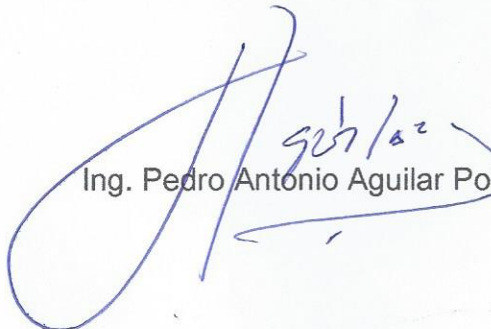
**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza, al trabajo de graduación del estudiante Benito Antonio Baca Méndez **ESTUDIO DE LA FUERZA ESPECÍFICA, ENERGÍA ESPECÍFICA Y FLUJO CRÍTICO EN CANALES ABIERTOS** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, septiembre 2019

/mrm.



*Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua*



DTG. 381.2019

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: **ESTUDIO DE LA FUERZA ESPECÍFICA, ENERGÍA ESPECÍFICA Y FLUJO CRÍTICO EN CANALES ABIERTOS**, presentado por el estudiante universitario: **Benito Antonio Baca Méndez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
  
Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, septiembre de 2019

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Mis padres**

Mariana Méndez Izara y Lino de Jesús Baca Cifuentes por su amor y apoyo incondicional, además por enseñarme que con esfuerzo, dedicación y trabajo todo sueño se hace realidad.

### **Mis tías**

Olivia y Patricia Méndez Izara (q.e.p.d) por su cariño y amor siendo como segundas madres para mí.

### **Mis amigos**

Por siempre estar a mi lado en las buenas y en las malas. En especial a Elnathan Hernández, Gilberth Monzón, Joel Xicara, Aaron Constanza, Mynor Sinay, Sedwin Ramos, Lupita García, Alfredo Quiñonez, Betzabe Sitán, Ricardo Guzmán, Bryan Bonilla y Marcos Galicia.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por ser el creador y dueño de todo, a él toda la honra y la gloria. Por brindarme la sabiduría y entendimiento para lograr mis sueños.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi alma máter y brindarme el orgullo de ser sancarlista.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por engrandecer mi conocimiento en sus aulas y forjar un profesional de bien para Guatemala.
<b>Escuela de Ingeniería Civil</b>	En especial a cada uno de los catedráticos del área profesional que compartieron sus conocimientos y amistad con mi persona.
<b>Departamentos de Estructuras e Hidráulica</b>	Por el conocimiento y experiencia al ser auxiliar de cátedra. En especial al Ing. Claudio Castañón, Ing. Rafael Morales, Ing. Dennis Argueta, Ing. Víctor López, Ing. Walter Salazar, Ing. Hugo Montenegro, Ing. Fredy Alvarado e Ing. José Arriola.
<b>Ing. Luis Sandoval</b>	Por su amistad, consejos y en especial por asesorarme en la elaboración de este trabajo de graduación.

**Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica**

Por su apoyo en la elaboración de este trabajo de graduación. En especial al Ing. Carlos Gordillo e Ing. Andy Alonzo.

**Sección Tecnología de la madera, CII, USAC**

Por su apoyo en la elaboración de este trabajo de graduación. En especial a Jesiel Enríquez, Ing. Fredy Contreras e Ing. Mauricio Rivera.

**Sección Socioeconómica, USAC**

Por su apoyo en los inicios de mi carrera. Por inculcarnos que un estudiante becado es sinónimo de excelencia, esfuerzo y dedicación.

**Lic. Cruz Haydée Quiroa**

Por su amistad, cariño y consejos, además de siempre motivarme a lograr mis metas. Gracias por esas largas pláticas en la sección socioeconómica.

**Lic. Anselma Jáuregui**

Por su amistad, cariño y consejos. Gracias por la confianza y aprecio como estudiante becado.

**Asociación de Estudiantes Becados AEB**

Por las experiencias vividas como estudiante becado y vicepresidente. Gracias por su cariño y apoyo incondicional.

**Honorable Comité de Huelga de Todos los Dolores Facultad de Ingeniería**

Por las experiencias vividas y la enseñanza que como sancarlistas nos debemos al pueblo de Guatemala. ¿Qué color hace la diferencia? ¡Gris y negro y por excelencia!

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN .....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN .....	XXIII
1. FLUJO EN CANALES ABIERTOS .....	1
1.1. Diferencia entre conducción de flujo a presión y libre .....	1
1.2. Definición de canal .....	5
1.3. Clasificación .....	5
1.3.1. Canales naturales.....	5
1.3.2. Canales artificiales.....	6
1.4. Elementos de la sección transversal del canal .....	8
1.5. Aplicaciones .....	10
2. ENERGÍA ESPECÍFICA, FUERZA ESPECÍFICA Y FLUJO CRÍTICO ...	13
2.1. Energía específica .....	13
2.1.1. Curva de energía específica .....	17
2.1.2. Régimen del flujo .....	19
2.1.3. Estado crítico del flujo.....	20
2.1.4. La energía específica y las transiciones .....	24
2.1.4.1. Obstáculos y estrechamientos.....	25
2.2. Fuerza específica .....	30
2.2.1. Momentum del flujo en canales abiertos .....	30

2.2.2.	Función momentum o fuerza específica.....	32
2.2.3.	Curva de fuerza específica.....	36
2.2.4.	Aplicaciones prácticas.....	38
2.3.	Flujo crítico.....	43
2.3.1.	Controles, ocurrencia de flujo crítico .....	47
2.3.2.	Aplicaciones practicas.....	53
3.	ENSAYOS.....	55
3.1.	Ensayo de fuerza específica .....	55
3.1.1.	Diseño y construcción de prisma para estudio de la fuerza específica .....	55
3.1.2.	Procedimiento experimental.....	59
3.1.3.	Datos y cálculos .....	63
3.1.4.	Gráficas.....	82
3.2.	Ensayo de energía específica .....	89
3.2.1.	Diseño y construcción de la estructura que modifica el fondo del canal para estudio de la energía específica.....	89
3.2.2.	Procedimiento experimental de la estructura que modifica el fondo del canal.....	93
3.2.3.	Diseño y construcción de la estructura que modifica el ancho del canal para estudio de la energía específica.....	96
3.2.4.	Procedimiento experimental de la estructura que modifica el ancho del canal .....	101
3.2.5.	Datos y cálculos para ambas estructuras.....	103
3.2.5.1.	Resultados del ensayo de energía específica empleando el prisma	

	triangular que modifica el fondo del canal .....	104
3.2.5.2.	Resultados del ensayo de energía específica empleando la reducción que modifica el ancho del canal.....	113
3.2.6.	Gráficas de los ensayos de energía específica empleando el prisma que modifica el fondo del canal .....	122
3.2.7.	Gráficas de los ensayos de energía específica empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	127
4.	INSTRUCTIVOS DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO .....	135
4.1.	Práctica de fuerza específica.....	135
4.2.	Práctica de energía específica cuando se modifica el fondo del canal .....	141
4.3.	Práctica de energía específica cuando se modifica el ancho del canal .....	146
	CONCLUSIONES .....	151
	RECOMENDACIONES .....	153
	BIBLIOGRAFÍA.....	155



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Flujo a presión y libre .....	2
2.	Comparación del flujo en tuberías y canales abiertos .....	3
3.	Secciones transversales comunes de canales.....	7
4.	Elementos geométricos de un canal .....	8
5.	Área y perímetro mojado de un canal .....	10
6.	Canal de irrigación .....	10
7.	Vertedero de demasía en Hidroeléctrica Chixoy .....	12
8.	Sección de canal para estudio de la energía específica .....	13
9.	Características de la curva de energía específica.....	17
10.	Flujo sobre un obstáculo .....	25
11.	Casos de flujo con la elevación de la solera del canal .....	27
12.	Casos de flujo con el estrechamiento del ancho de un canal.....	29
13.	Esquema para el análisis de la ecuación de cantidad de movimiento en un flujo a superficie libre .....	32
14.	Curva de fuerza específica.....	36
15.	Comparación curva energía específica y fuerza específica .....	39
16.	Comportamiento de la energía específica y la fuerza específica en el flujo a través de una compuerta y en el desarrollo de un resalto hidráulico.....	40
17.	Principio de momentum aplicado al flujo sobre un vertedero de pared gruesa .....	41
18.	Curva de energía específica para caudal constante .....	45
19.	Curva caudal contra tirante para energía específica constante .....	46



20.	Dimensiones del prisma rectangular.....	55
21.	Elaboración de prisma rectangular con poliestireno expandido.....	56
22.	Colocación de refuerzo de malla de harnero al prisma rectangular.....	56
23.	Tamizado y elaboración de mezcla para fundición de prisma rectangular.....	57
24.	Fundición de prisma rectangular.....	57
25.	Lijado de la superficie del prisma rectangular.....	58
26.	Pegado de foami a la base y caras laterales del prisma rectangular....	58
27.	Aplicación de impermeabilizante al prisma rectangular.....	59
28.	Canal hidrodinámico del Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica.....	60
29.	Sección transversal del canal hidrodinámico del Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica.....	60
30.	Instalación y montaje de prisma rectangular en el canal del laboratorio.....	61
31.	Lectura de tirante de agua sobre el prisma rectangular empleando el limnómetro.....	62
32.	Aforo de caudal para el prisma rectangular.....	62
33.	Perfil del flujo sobre el prisma rectangular.....	66
34.	Perfil del flujo sobre el prisma rectangular para las tres tomas de datos.....	66
35.	Análisis de fuerzas sobre la cara del prisma rectangular.....	74
36.	Gráfica de energía específica toma de datos 1 empleando el prisma rectangular.....	83
37.	Gráfica de energía específica toma de datos 2 empleando el prisma rectangular.....	83
38.	Gráfica de energía específica toma de datos 3 empleando el prisma rectangular.....	84

39.	Gráfica de comparación de energía específica de las tres tomas de datos empleando el prisma rectangular .....	85
40.	Gráfica fuerza específica toma de datos 1 empleando el prisma rectangular .....	86
41.	Gráfica fuerza específica toma de datos 2 empleando el prisma rectangular .....	87
42.	Gráfica fuerza específica toma de datos 3 empleando el prisma rectangular .....	87
43.	Gráfica de comparación de fuerza específica de las tres tomas de datos empleando el prisma rectangular .....	88
44.	Dimensiones del prisma triangular que modifica el fondo del canal.....	89
45.	Elaboración de prisma triangular con poliestireno expandido .....	90
46.	Colocación de refuerzo de malla de harnero al prisma triangular .....	90
47.	Tamizado y elaboración de mezcla para fundición de prisma triangular .....	91
48.	Fundición de prisma triangular .....	91
49.	Lijado de la superficie del prisma triangular .....	92
50.	Pegado de foami a la base y caras laterales del prisma triangular .....	92
51.	Aplicación de impermeabilizante al prisma .....	93
52.	Instalación y montaje de prisma triangular en el canal del laboratorio .....	94
53.	Lectura de tirante de agua sobre el prisma triangular empleando el limnómetro .....	95
54.	Aforo de caudal para el prisma triangular.....	95
55.	Modelo 3d de la reducción que modifica el ancho del canal .....	96
56.	Dimensiones de la reducción que modifica el ancho del canal .....	97
57.	Elaboración de molde de la reducción .....	98
58.	Molde de la reducción .....	98
59.	Corte de piezas de la reducción .....	99

60.	Moldeado de paredes de la reducción .....	99
61.	Pegado de piezas de la reducción .....	100
62.	Estructura final de la reducción.....	100
63.	Instalación y montaje de la reducción en el canal del laboratorio .....	102
64.	Lectura de tirante de agua en la reducción empleando el limnómetro. 102	
65.	Aforo de caudal de la reducción.....	103
66.	Perfil del flujo sobre el prisma triangular que modifica el fondo del canal .....	107
67.	Perfil del flujo sobre el prisma triangular que modifica el fondo del canal para las cinco tomas de datos.....	107
68.	Perfil del flujo en la reducción que modifica el ancho del canal .....	116
69.	Perfil del flujo en la reducción que modifica el ancho del canal para las cinco tomas de datos .....	116
70.	Gráfica de energía específica toma de datos 1 empleando el prisma que modifica el fondo del canal.....	123
71.	Gráfica de energía específica toma de datos 2 empleando el prisma que modifica el fondo del canal.....	123
72.	Gráfica de energía específica toma de datos 3 empleando el prisma que modifica el fondo del canal.....	124
73.	Gráfica de energía específica toma de datos 4 empleando el prisma que modifica el fondo del canal.....	124
74.	Gráfica de energía específica toma de datos 5 empleando el prisma que modifica el fondo del canal.....	125
75.	Gráfica de comparación de energía específica de las cinco tomas de datos empleando el prisma que modifica el fondo del canal.....	126
76.	Gráfica de energía específica de las cinco tomas de datos empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	128
77.	Gráfica de tirante contra caudal unitario toma de datos 1 empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	130

78.	Gráfica de tirante contra caudal unitario toma de datos 2 empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	130
79.	Gráfica de tirante contra caudal unitario toma de datos 3 empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	131
80.	Gráfica de tirante contra caudal unitario toma de datos 4 empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	131
81.	Gráfica de tirante contra caudal unitario toma de datos 5 empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	132
82.	Gráfica de comparación de tirante contra caudal unitario de las cinco tomas de datos empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	133
83.	Prisma rectangular para practica de fuerza específica .....	136
84.	Prisma triangular para práctica de energía específica cuando se modifica el fondo del canal .....	142
85.	Reducción para práctica de energía específica cuando se modifica el ancho del canal .....	147

## TABLAS

I.	Diferencias del flujo en tuberías y canales .....	4
II.	Tipos de flujo y su relación con el número de Froude .....	21
III.	Caudales obtenidos empleando el prisma rectangular .....	64
IV.	Tirante del flujo empleando el prisma rectangular .....	65
V.	Cálculos toma de datos 1 empleando el prisma rectangular .....	71
VI.	Cálculos toma de datos 2 empleando el prisma rectangular .....	72
VII.	Cálculos toma de datos 3 empleando el prisma rectangular .....	72
VIII.	Tirantes críticos teóricos empleando el prisma rectangular .....	73

IX.	Datos para cálculo de la fuerza por unidad de ancho sobre la cara del prisma rectangular.....	77
X.	Resultados de fuerza por unidad de ancho sobre la cara del prisma rectangular .....	77
XI.	Datos para cálculo de caudal teórico con la ecuación 13 .....	78
XII.	Comparación caudal unitario teórico y experimental con la ecuación 13.....	79
XIII.	Datos para cálculo de caudal teórico con la ecuación 36 .....	81
XIV.	Comparación caudal unitario teórico y experimental con la ecuación 36.....	81
XV.	Comparación caudal unitario teórico y experimental con la ecuación 36 usando el tirante crítico .....	82
XVI.	Datos para gráficas de energía específica en el ensayo empleando el prisma rectangular.....	82
XVII.	Datos para gráficas de fuerza específica empleando el prisma rectangular .....	86
XVIII.	Caudales obtenidos empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal.....	105
XIX.	Tirante del flujo empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal.....	106
XX.	Cálculos toma de datos 1 empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal.....	108
XXI.	Cálculos toma de datos 2 empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal.....	109
XXII.	Cálculos toma de datos 3 empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal.....	110
XXIII.	Cálculos toma de datos 4 empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal.....	111

XXIV.	Cálculos toma de datos 5 empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal .....	112
XXV.	Tirantes críticos teóricos empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal .....	113
XXVI.	Caudales obtenidos empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	114
XXVII.	Tirante del flujo empleando la reducción que modifica el ancho del canal.....	115
XXVIII.	Cálculos toma de datos 1 empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	117
XXIX.	Cálculos toma de datos 2 empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	118
XXX.	Cálculos toma de datos 3 empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	119
XXXI.	Cálculos toma de datos 4 empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	120
XXXII.	Cálculos toma de datos 5 empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	121
XXXIII.	Datos para gráficas de energía específica empleando el prisma que modifica el fondo del canal .....	122
XXXIV.	Datos para gráficas de energía específica empleando la reducción que modifica el ancho del canal .....	127
XXXV.	Datos para gráficas de tirante contra caudal unitario empleando la reducción que modifica el ancho del canal.....	129
XXXVI.	Cuadros para toma de datos para práctica de fuerza específica .....	140
XXXVII.	Cuadros para toma de datos para práctica de energía específica cuando se modifica el fondo del canal.....	145
XXXVIII.	Cuadros para toma de datos para práctica de energía específica cuando se modifica el ancho del canal.....	150



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>g</b>	Aceleración de la gravedad
<b><math>h_p</math></b>	Altura piezómetro del tanque aforador
<b>h</b>	Altura vertedero
<b>b</b>	Ancho del canal
<b>q</b>	Caudal unitario
<b>Q</b>	Caudal volumétrico
<b>cm</b>	Centímetros
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centímetros cúbicos
<b><math>\rho</math></b>	Densidad
<b>E</b>	Energía específica
<b><math>F_f</math></b>	Fuerza de fricción
<b>M</b>	Fuerza específica
<b>l</b>	Litro
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>m</b>	Metros
<b>N</b>	Newtons
<b><math>F_R</math></b>	Número de Froude
<b><math>\gamma</math></b>	Peso específico
<b>s</b>	Segundos
<b>t</b>	Tiempo
<b>y</b>	Tirante
<b><math>y_c</math></b>	Tirante crítico
<b>H</b>	Tirante sobre el vertedero



**v** Velocidad del flujo en una sección de canal  
**V** Volumen

## GLOSARIO

<b>Aforar</b>	Medir la cantidad de agua que lleva una corriente en una unidad de tiempo.
<b>Agua abajo</b>	Se usa para referirse a un punto situado después de la sección considerada, avanzando en el sentido de la corriente.
<b>Agua arriba</b>	Se usa para referirse a un punto situado antes de la sección considerada, avanzando en el sentido de la corriente.
<b>CAS</b>	Sistema algebraico computacional o sistema de álgebra computacional (CAS, del inglés computer algebra system) es un programa de ordenador o calculadora avanzada que facilita el cálculo simbólico.
<b>Fluido</b>	Sustancia que se deforma continuamente al ser sometida a esfuerzos de corte.
<b>Flujo</b>	Movimiento de un fluido que atraviesa una sección transversal.
<b>Fuerza hidrostática</b>	Presión debida al peso de un fluido en reposo.

<b>Gradiente hidráulico</b>	Perdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el fluido, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo.
<b>Intercara</b>	Superficie de separación entre dos fluidos.
<b>Medidor Venturi</b>	Instrumento utilizado para medir la velocidad de un fluido incompresible.
<b>Perfil de flujo</b>	Representación gráfica del flujo en un canal abierto.
<b>Piezómetro</b>	Instrumento utilizado para medir la presión del flujo.
<b>Presa</b>	Muro que se construye en sentido transversal a la corriente de un río, para detener y embalsar el agua o derivar la fuerza de su cauce.
<b>Prisma</b>	Cuerpo geométrico formado por dos caras planas poligonales, paralelas e iguales, que se llaman bases, y tantas caras rectangulares como lados tiene cada base.
<b>Rápida</b>	Es una sección de canal con pendiente muy pronunciada.
<b>Resalto hidráulico</b>	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.

**Socavar**

Resultado de la acción erosiva del flujo de agua que arranca y acarrea material del lecho.

**Vertedero**

Dispositivo utilizado para regular y medir caudales en cauces de ríos y canales abiertos.

**Vertedero de pared gruesa**

Vertedero cuyo labio tiene el espesor suficiente como para que se produzca sobre él régimen crítico, para lo cual, si B es el espesor del labio y H la altura hidrostática medida aguas arriba del vertedero, la relación  $H/B$  tendrá que ser mayor de 0,08.

**Volumen de control**

Espacio arbitrario que se instituye con el objeto de estudio.



## RESUMEN

En muchos casos el diseño de canales se limita al dimensionamiento del mismo de acuerdo a un caudal que se requiere transportar, y cumple para los fines prácticos deseados, pero no se analiza en el diseño los efectos físicos y geométricos que pueden producir cambios en el régimen del flujo y si no son controlados generan deterioro o colapso de la estructura.

Cuando se presentan fallas en canales abiertos o en perfiles hidráulicos de puentes, generalmente se debe a la presencia de la circulación de un flujo supercrítico en la sección del canal, esto producto de un mal control de la sección hidráulica o la falta de análisis de los fenómenos de fuerza específica, energía específica y flujo crítico en el diseño hidráulico, aunado que durante el funcionamiento de los canales, no se evalúa como está funcionando el mismo ni se le realizan los mantenimientos correspondientes.

Se estudian estos fenómenos; desarrollando las características y su comportamiento junto con el fundamento teórico y científico de los mismos. Además, se realizaron tres modelos físicos que producen y hacen variar el flujo en un canal para lograr el estudio de la fuerza específica, energía específica y el flujo crítico en canales abiertos, esto con el propósito de observar, analizar y calcular el comportamiento de los mismos.

Al final se implementan ensayos en el laboratorio que contribuyen al proceso enseñanza-aprendizaje de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil, específicamente del curso de Hidráulica de Canales, y se tendrá una mejor comprensión de estos fenómenos al experimentar con ellos de forma real.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Analizar el comportamiento de la fuerza específica, energía específica y flujo crítico en canales abiertos, mediante modelos físicos.

### **Específicos**

1. Conocer las condiciones físicas e hidráulicas que intervienen en el comportamiento de la fuerza específica, energía específica y flujo crítico, detallando que los causa, sus efectos y sus consecuencias.
2. Relacionar la teoría y la práctica a través de experimentos de laboratorio que permita estudiar las características y el comportamiento de la fuerza específica, energía específica y flujo crítico.
3. Establecer los criterios de diseño que permitan enfocar de una manera fácil y sencilla las diferentes maneras de reducir o evitar el impacto fuerza específica, energía específica y flujo crítico en las secciones de canales abiertos.
4. Proponer prácticas de laboratorio para el estudio y comprensión de la fuerza específica, energía específica y flujo crítico en los cursos de Hidráulica e Hidráulica de Canales.





## INTRODUCCIÓN

El conocimiento del flujo en canales abiertos es importante para el diseño de obras hidráulicas porque su comportamiento difiere del que se presenta en el flujo en tuberías a presión. El poder entender el comportamiento dinámico del flujo a lo largo del perfil hidráulico de un canal, permite tomar una decisión correcta con respecto a la geometría de los canales. Al diseñar se debe de analizar físicamente los fenómenos como la fuerza específica, energía específica y el flujo crítico en especial en las transiciones.

La energía específica es un fenómeno presente en el flujo en canales, que muestra la variación de la energía en función del tirante del flujo, su estudio es importante al permitir resolver problemas en los que interviene el flujo crítico en transiciones; mientras que la fuerza específica permite calcular fuerzas de interacción del flujo con estructuras hidráulicas, para evitar comportamientos no deseados del mismo o falla de las estructuras. Ambos fenómenos están relacionados con el flujo crítico, que realiza el cambio entre regímenes de flujo de subcrítico a supercrítico y viceversa, condición que en ocasiones no es deseada en las obras hidráulicas y debe ser controlada por medio de la geometría del canal por medio de transiciones o estructuras de control.

Conociendo la importancia que representan dichos fenómenos en el comportamiento del flujo, esta investigación se enfoca en su estudio tanto teórico como experimental de los mismos.



# 1. FLUJO EN CANALES ABIERTOS

## 1.1. Diferencia entre conducción de flujo a presión y libre

La conducción se puede definir como: “un volumen de control finito que sirve para transportar un fluido entre dos puntos”<sup>1</sup>. Dicha conducción en el caso de los fluidos en la mayoría de las aplicaciones de la ingeniería se requiere transportar el mismo desde una fuente de abastecimiento hacia otro sitio ya sea para su almacenamiento, tratamiento o consumo. Para dicho fin se poseen dos tipos de conducción:

- Conducción cerrada, como lo son las tuberías
- Conducción abiertos, como los canales o los cauces naturales

En la conducción se puede presentar el flujo a presión y el flujo libre. El flujo a presión se presenta cuando el líquido y el contorno sólido del conducto cerrado se encuentran en contacto a lo largo de todo el perímetro transversal, es decir que el área del conducto,  $A_o$ , es igual al área del flujo,  $A_f$ , [figura 1(a)], por lo cual, el flujo ejerce una presión manométrica no nula sobre la pared sólida que lo encierra. Como ejemplos de flujo a presión se pueden mencionar los sistemas de abastecimiento de agua potable.

En circunstancias apropiadas, un líquido puede fluir en un conducto cerrado sin hacer contacto total con el perímetro que lo encierra, es decir  $A_o > A_f$ , y el área del flujo ejercería una presión manométrica positiva sobre el contorno sólido [figura 1(b)]. El área que no conduce fluido  $A_1$  contiene

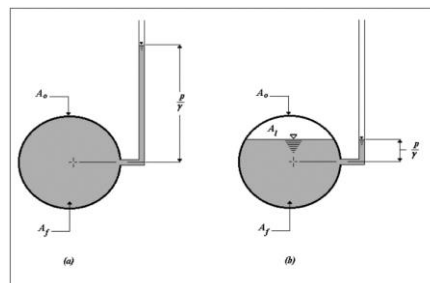
---

<sup>1</sup> CADAVID R., Juan H. *Hidráulica de canales: fundamentos*. p. 6.

únicamente aire y está sometida a una presión manométrica nula. El límite inferior del área  $A_1$  lo marca el nivel del fluido en la sección. La superficie que interseca este nivel se encuentra libre de una presión diferente de la del aire, y por este hecho se le llama superficie libre y por consiguiente el flujo es a superficie libre.

La superficie libre se define como “la intercara entre dos fluidos: el superior, que es el aire estacionario o en movimiento, y el inferior, que usualmente es agua en movimiento”<sup>2</sup>. Un ejemplo de flujo libre son las tuberías de alcantarillado cuando el agua no llena completamente el conducto y por lo tanto se encuentra sometido a la presión de la atmósfera de forma directa. En las conducciones abiertas el flujo siempre se presenta a superficie libre.

Figura 1. **Flujo a presión y libre**



Fuente: CADAVID, Juan. *Hidráulica de canales fundamentos*. p. 7.

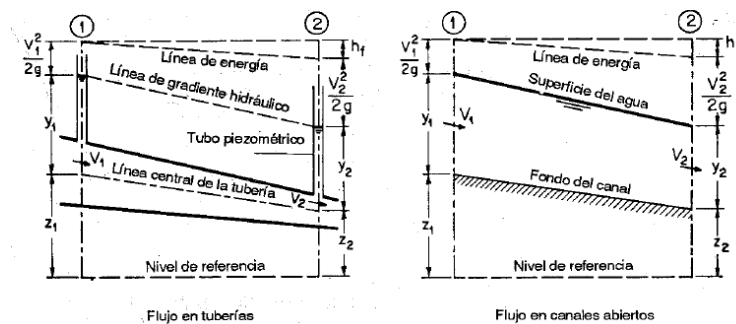
Ven Te Chow compara el flujo a superficie libre y en una tubería a presión y realiza el análisis de la figura 2, a la izquierda se muestra el flujo en una tubería, si en esta se instalaran dos tubos piezométricos en las secciones 1 y 2 los niveles de estos se mantendrán debido a la acción de la presión existente en la tubería en cotas las cuales se representan por la línea conocida como

<sup>2</sup> SOTELO AVILA, Gilberto. *Hidráulica de canales*. p. 1.

“gradiente hidráulico”. La presión en los tubos piezométricos se indica por medio de la altura  $y$  de la columna de agua medida desde el eje central de la tubería. La energía total del flujo en las secciones es la suma de la elevación  $z$  del eje central de la tubería medida desde un nivel de referencia, la altura piezométrica  $y$  y la altura de carga cinética  $v^2/2g$ , donde  $v$  es la velocidad media del flujo. Además, en el flujo en tuberías debido a que el material no es ideal entre las dos secciones de análisis existen pérdidas de energía cuando el agua fluye de la sección 1 a la 2 y está se representa como  $h_f$ .

A la derecha en la figura 2 se muestra un diagrama del comportamiento del flujo en un canal si se supone que la pendiente del mismo es pequeña y que posee una distribución uniforme de la velocidad entonces el flujo es paralelo al fondo del mismo y en este caso la superficie misma del agua es la línea de gradiente hidráulico y la altura del agua corresponde a la altura piezométrica.

Figura 2. **Comparación del flujo en tuberías y canales abiertos**



Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 4.

A pesar de la similitud entre ambos flujos se debe destacar que la resolución de problemas de flujo en canales es más compleja que en tuberías a presión. La superficie del flujo en canales no permanece permanente con el

tiempo y con el espacio, y también por el hecho que la profundidad del flujo, el caudal y las pendientes del fondo del canal y de la superficie libre del flujo son interdependientes; además la geometría y la rugosidad de un canal puede variar de una sección a otra y provoca cambios en el régimen del flujo.

Por lo anterior el estudio del flujo en los canales es más empírico comparado con el flujo en tuberías. Actualmente el método empírico es el mejor método disponible en el presente y aplicado de manera cuidadosa genera resultados de valor práctico.

Para comprender de mejor manera el flujo en tuberías, en la tabla I se presenta una comparación entre ambas:

Tabla I. **Diferencias del flujo en tuberías y canales**

<b>Tubería</b>	<b>Canal</b>
<b>Presión</b>	
El líquido se encuentra confinado y ejerce presión sobre el contorno de la tubería.	La superficie libre se encuentra en contacto con la atmosfera.
<b>Área Transversal</b>	
El área se mantiene constante	El área es variable pro no cual no está predeterminada y es una variable que depende de la profundidad del flujo y otros parámetros hidráulicos.
<b>Circulación del agua</b>	
Se realiza por la presión ejercida por una fuente ya sea una bomba o una diferencia de altura.	Se realiza por medio de la acción de la gravedad.
<b>Rugosidad</b>	
Poseen poca rugosidad	Pueden poseer superficies lisas o muy rugosas como los canales de tierra o de mampostería.

Fuente: elaboración propia.

## **1.2. Definición de canal**

La relación entre los conceptos de conducción y los tipos de flujo ayudan a definir un canal. Este informe se centra en la definición de canal abierto como “aquél en que la corriente no está completamente encerrada por contornos sólidos, teniendo así una superficie libre sujeta solamente a la presión atmosférica. El flujo dentro de dicho canal no se origina por una carga externa sino más bien por la componente de la gravedad que actúa en el sentido de la pendiente del canal”<sup>3</sup>.

## **1.3. Clasificación**

Los canales se clasifican de acuerdo a su origen como naturales y artificiales.

### **1.3.1. Canales naturales**

Los canales naturales son las conducciones hidráulicas que existen para el drenaje natural sobre la superficie terrestre, estos varían de acuerdo con su tamaño y van desde arroyos, hasta grandes quebradas, ríos y estuarios. El flujo en un canal natural se aloja dentro de lo que se denomina cauce y ha sido generado a lo largo del tiempo por el movimiento del agua que arrastra materia en suspensión, arena y rocas lo cual hace que el perfil natural sea sinuoso y la sección transversal sea irregular a lo largo del mismo.

---

<sup>3</sup> FRANZINI, Joseph B. y FINNEMORE, E. John. *Mecánica de fluidos*. p. 255.



### 1.3.2. Canales artificiales

Los canales artificiales son construidos mediante la acción antropogénica, tales como los canales de riego, de navegación, cunetas, alcantarillados, entre otros. Los canales artificiales por lo general poseen secciones geométricas de formas y dimensiones constantes en tramos más o menos largos, cuando el canal posee sección transversal e inclinación del fondo constante se les denomina prismáticos.

El término sección de canal se refiere a la “sección transversal tomada en forma perpendicular a la dirección del flujo”<sup>4</sup>; las secciones transversales más comunes son las siguientes:

- Sección trapezoidal: Es la sección más común tanto en canales revestidos como no revestidos. Se usa en canales de tierra debido a que proveen las pendientes necesarias para brindar estabilidad a los taludes.
- Sección rectangular: Debido a que el rectángulo tiene lados verticales, por lo general se utiliza para canales construidos con materiales estables como concreto, mampostería y madera.
- Sección triangular: Se emplea en cunetas revestidas en carreteras, también en canales de tierra pequeños, fundamentalmente por facilidad de trazo. También se emplean revestidas, como en alcantarillas de las carreteras.
- Sección parabólica: Se emplea en algunas ocasiones para canales revestidos y es la forma que toman aproximadamente muchos canales naturales y canales viejos de tierra.

---

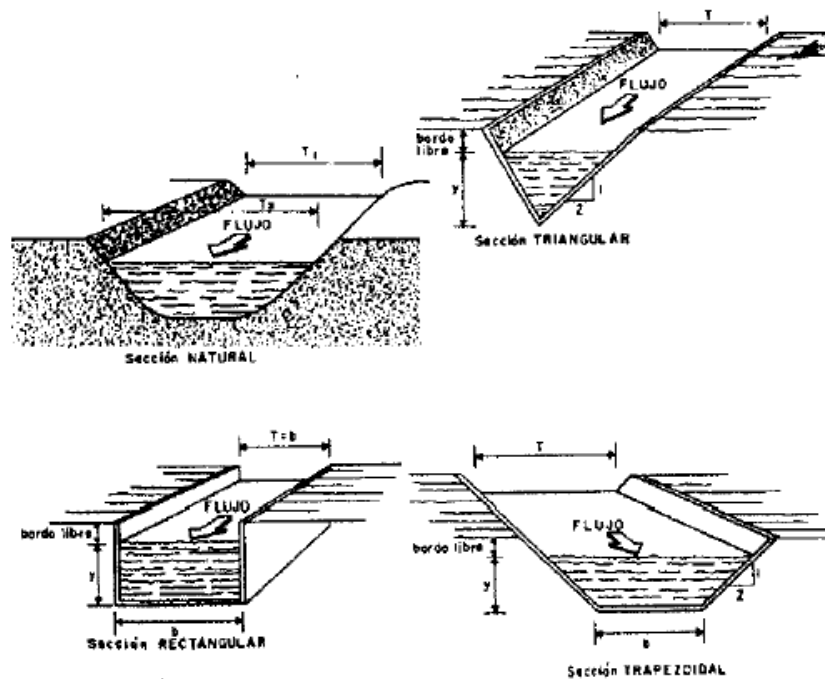
<sup>4</sup> VILLÓN, Máximo G. *Hidráulica de canales*. p. 15.

En cuanto se refiere a secciones cerradas se tienen las siguientes:

- Sección circular: El círculo es la sección más común para alcantarillados tanto sanitario como pluvial, colectores y túneles.
- Sección de herradura: Se usan comúnmente para alcantarillas y estructuras hidráulicas importantes.

La selección de la forma determinada de la sección transversal depende del tipo de canal por construir, de las condiciones en las que se empleará, los materiales disponibles para su construcción y el uso que se le dará.

Figura 3. **Secciones transversales comunes de canales**



Fuente: VILLÓN, Máximo. *Hidráulica de canales*. p. 17.

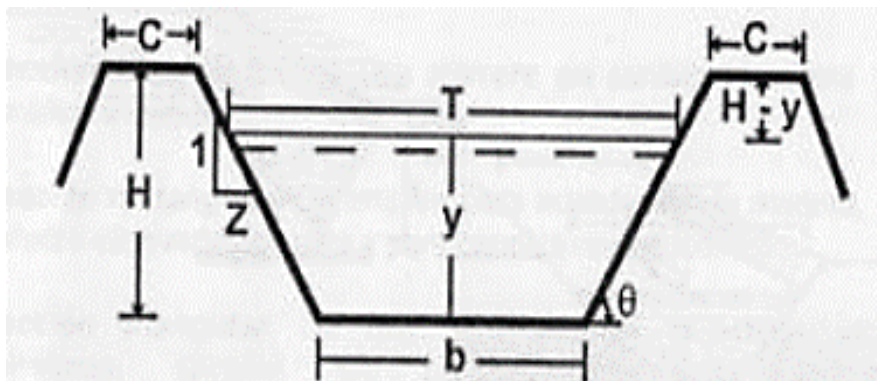
#### 1.4. Elementos de la sección transversal del canal

Los elementos geométricos son “propiedades de una sección de canal que pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad del flujo. Estos elementos son muy importantes y se utilizan con amplitud en el cálculo del flujo”<sup>5</sup> y los fenómenos presentes en el.

Para secciones de canales rectangulares y simples, los elementos geométricos pueden definirse matemáticamente en términos de las dimensiones de la sección y la profundidad del flujo, pero en secciones más complejas y secciones de corrientes naturales no es posible definir ecuaciones simples para definir estos elementos para estos casos se emplean curvas que representan la relación entre estos elementos y la profundidad del flujo para uso en cálculos hidráulicos.

Los elementos geométricos de la sección transversal son los siguientes:

Figura 4. Elementos geométricos de un canal



Fuente: VILLÓN, Máximo. *Hidráulica de canales*. p. 18.

<sup>5</sup> CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 22.

- $y$  = tirante de agua, es la distancia vertical medida desde el fondo del canal hasta la superficie del agua.
- $b$  = ancho de solera, ancho de platilla o plantilla, es el ancho de la base del canal.
- $T$  = espejo de agua, es el ancho de la superficie libre de agua.
- $C$  = ancho de corona.
- $H$  = profundidad total del canal.
- $H - y$  = borde libre.
- $\theta$  = ángulo de inclinación de las paredes laterales con la horizontal.
- $Z$  = talud, es la relación de la proyección horizontal de la vertical de la pared lateral. Es decir,  $Z$  es el valor de la proyección horizontal cuando la vertical es 1.
- $A$  = área hidráulica, es la superficie ocupada por el líquido en una sección transversal cualquiera.
- $p$  = perímetro mojado, es la parte del contorno del conducto que esta en contacto con el líquido.
- $R$  = radio hidráulico, es la dimensión característica de la sección transversal, hace las funciones del diámetro en tuberías se obtiene de la siguiente relación.

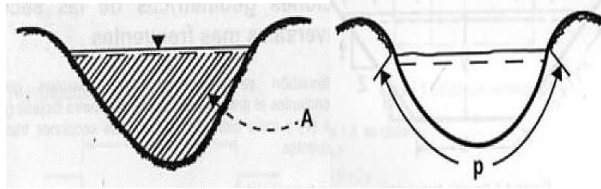
$$R = \frac{A}{p} \quad \text{EC. 1}$$

- $\bar{y}$  = profundidad media, es la relación entre el área hidráulica y el espejo de agua, es decir:

$$\bar{y} = \frac{A}{T} \quad \text{EC. 2}$$

En otras bibliografías como Richard French y Ven Te Chow la profundidad media se expresa con la variable  $D$ .

Figura 5. **Área y perímetro mojado de un canal**



Fuente: VILLÓN, Máximo. *Hidráulica de canales*. p. 19.

### 1.5. Aplicaciones

La mayoría de los canales son diseñados y construidos por el hombre y entre las principales aplicaciones se tienen las siguientes:

- Canales de irrigación: también llamados acequia, son principalmente empleados en áreas rurales, se diseñan en función del tipo de cultivo, área cultivada y el tipo de suelo. Su función es desviar el agua de cauces naturales y llevarlos al punto requerido. La pendiente del canal constituye el factor de importancia para su funcionamiento.

Figura 6. **Canal de irrigación**



Fuente: Canales de irrigación, Asunción Mita, Jutiapa.

- Canales de abastecimiento: son aquellos empleados para conducir el agua para consumo de una población, su diseño se basa en parámetros como la dotación, población a servir y el periodo de diseño.
- Canales para el control de inundaciones: son obras de protección que se emplean para interceptar y conducir las aguas superficiales que representan un riesgo de inundación. Son principalmente empleados en proyectos de infraestructura vial como lo son las cunetas y contracunetas conduciendo el agua a un lugar donde no represente riesgo para la carretera. Para su diseño se emplean parámetros como el área tributaria, coeficiente de escorrentía e intensidad de la lluvia.
- Vías navegables: son vías de agua por lo general construidos por el hombre para conectar ríos u océanos. Son empleados para el transporte de barcas en los canales fluviales y barcos en los canales que conectan océanos como el canal de Panamá. El diseño de estos canales depende de su geometría y comportamiento hidráulica que permita navegar a las embarcaciones.
- Alcantarillados: los diseños de alcantarillado tanto pluvial como sanitario se diseñan como canales porque el flujo no llena la sección de la tubería. El diseño de ellos depende de las velocidades de diseño, tirantes y pendientes.
- Aforadores: son canales creados con el fin de regular y medir el caudal en canales de riego, cauces de ríos no navegables, drenajes, entre otros. Ejemplo de canales aforadores es el canal Parshall que se emplea en plantas de tratamiento para medir los caudales que ingresan a ellas.

- Vertederos de excedencia: también llamados vertederos de demasía son canales construidos para transporta volúmenes de agua que no pueden retenerse en el vaso de una presa de almacenamiento cuando existe exceso de volumen como el que sucede en épocas de lluvia.

Figura 7. **Vertedero de demasía en Hidroeléctrica Chixoy**



Fuente: Vertedero de demasía, Hidroeléctrica Chixoy.

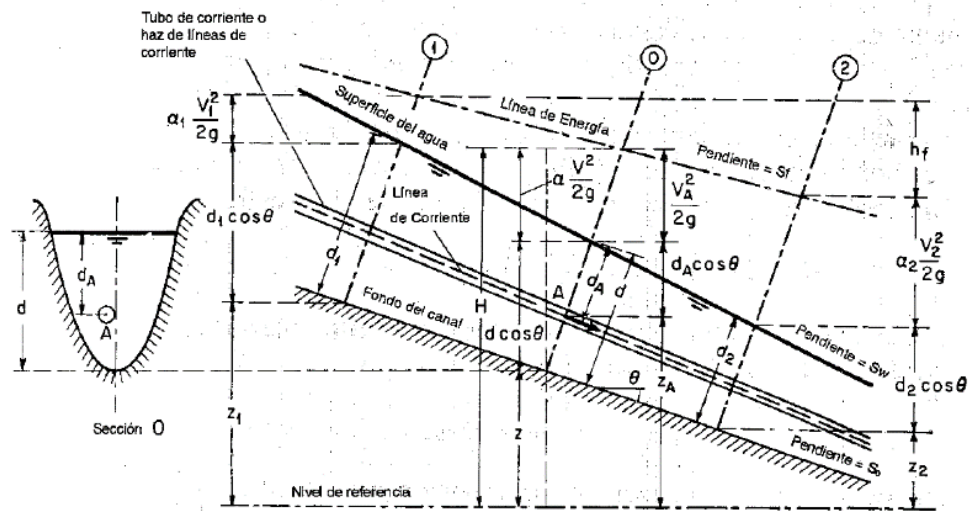
- Obras de rectificación para corrientes naturales: cuando existen ríos con zonas muy turbulentas que tienden a socavar el lecho del mismo o poner en riesgo obras cercanas por lo general se construyen canales para rectificar el flujo del río y que no represente riesgo a construcciones aledañas.
- Canales de laboratorio: en estos canales las propiedades y fenómenos hidráulicos pueden ser controlados, permite experimentar y producir resultados bastante similares a las condiciones reales los cuales son empleados para la docencia e investigación.

## 2. ENERGÍA ESPECÍFICA, FUERZA ESPECÍFICA Y FLUJO CRÍTICO

### 2.1. Energía específica

La energía específica es una cantidad útil para el estudio del flujo de canales abiertos y mediante su adecuada consideración se puede resolver los más complejos problemas de transiciones cortas, en los que los efectos de rozamiento son despreciables.

Figura 8. Sección de canal para estudio de la energía específica



Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 39.

El uso del término “energía específica” para denominar la energía con respecto al fondo del canal, este simple concepto era una herramienta



importante en el análisis de muchos problemas interesantes de canales. Así, la energía específica en la sección de un canal se define como la energía por unidad de peso de fluido medida con respecto al fondo del canal de dicho punto y esta definición se aplica a cualquier sección de canal.

En hidráulica elemental se sabe que la energía total del agua de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección de canal “se puede expresar como la altura total de agua, que es igual a la suma de la elevación por encima del nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad”<sup>6</sup>.

Con respecto al plano de referencia, la altura total  $H$  de una sección  $O$  que contiene el punto  $A$  en una línea de corriente de un canal con pendiente alta como en la figura 8, se puede expresar como:

$$H = z_A + d_A \cos \theta + \frac{V_A^2}{2g} \quad \text{EC. 3}$$

Donde  $z_A$  es la elevación del punto  $A$  por encima del plano de referencia,  $d_A$  la profundidad del punto  $A$  por debajo de la superficie de agua medida a lo largo de la sección del canal,  $\theta$  es el ángulo de la pendiente del fondo del canal y  $V_A^2/2g$  el termino es la altura de velocidad del flujo en la línea de corriente que pasa por  $A$ .

En general, cada línea de corriente que pasa a través de una sección del canal poseerá una altura de velocidad diferente, debido a la distribución no uniforme de velocidad en flujos reales, con el fin de tener en cuenta esta distribución puede utilizarse el coeficiente de energía para corregir ese efecto. Entonces, la energía en la sección del canal es:

---

<sup>6</sup> CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 39.

$$H = z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad \text{EC. 4}$$

La energía específica se define como la energía en cualquier sección de un canal medida con respecto al fondo de este. La energía específica se denota con una  $E$  y se obtiene si se toma el fondo del canal  $z = 0$  en la ecuación 4.

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad \text{EC. 5}$$

Donde:

- $E$  = energía específica en una sección dada de canal
- $d$  = profundidad del flujo
- $\theta$  = ángulo que forma el fondo del canal con respecto a la horizontal (°)
- $\alpha$  = factor de corrección de la energía cinética
- $v$  = velocidad media en la sección
- $g$  = aceleración debido a la gravedad

La forma generalizada de esta expresión, cuando se tiene un canal con pendiente pequeña permite suponer que  $d \cos \theta$  es igual a la profundidad de la lámina de agua  $y$ , además si se asume que el factor de corrección de la energía cinética es 1, se obtiene:

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \quad \text{EC. 6}$$

“La suposición inherente de la ecuación 5 es que la pendiente del canal es pequeña denotando que  $d \cos \theta \cong 1$  y  $y = d \cos \theta$ . En general si  $\theta < 10^\circ$  o  $S < 0,018$  donde  $S$  es la pendiente del canal la ecuación 6 es válida”<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> FRENCH, Richard H. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 46.

La ecuacion 6 muestra que la energía específica para una seccion de canal en un punto dado, corresponde a la suma de la profundidad de la lámina de agua mas la carga o altura de velocidad. Es frecuente expresar expresar la ecuacion anterior en funcion del caudal, empleando la ecuacion de continuidad despejada para la velocidad se obtiene:

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{EC. 7}$$

Y sustituyendo esa expresion en la ecuacion 6 se obtiene:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad \text{EC. 8}$$

En la expresión anterior  $A$  corresponde al área de la sección transversal del flujo. Además, puede observarse que para una sección de canal y un caudal  $Q$  determinados, la energía específica en una sección de canal sólo es función de la profundidad del flujo.

En canales rectangulares de ancho  $b$  se emplea el término  $q$  que expresa el caudal por unidad de ancho:

$$q = \frac{Q}{b} \quad \text{EC. 9}$$

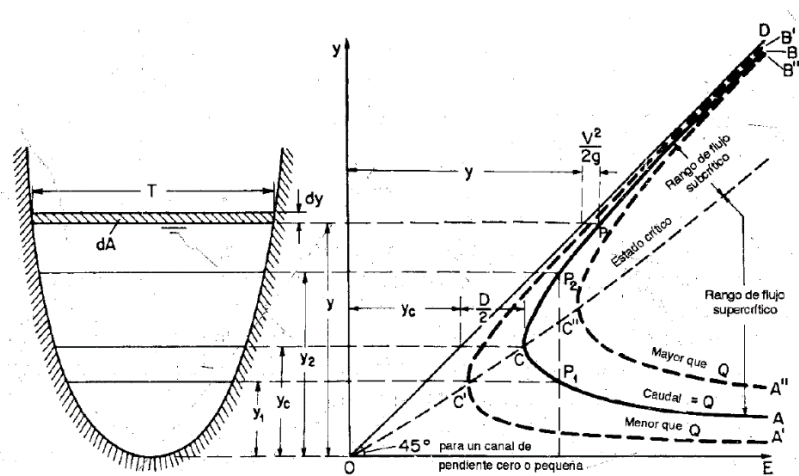
Si se sustituye dicha expresión en la ecuación 8 se obtiene la expresión de energía específica aplicable únicamente a canales rectangulares, y solo es función del caudal unitario y la profundidad del flujo.

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad \text{EC. 10}$$

### 2.1.1. Curva de energía específica

Si se tiene un caudal constante que descarga libremente por un canal de sección constante, es posible construir un gráfico de las diferentes profundidades de la lámina de agua contra sus respectivos valores de energía específica, tal como se presenta en la siguiente figura. Se obtiene una curva que se conoce como la curva de energía específica.

Figura 9. Características de la curva de energía específica



Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 42.

Para obtener experimentalmente la curva de energía específica completa es necesario que, para un caudal constante, en una primera situación el canal que tenga una pendiente muy pequeña (puede ser cero o contrapendiente) y en la segunda el canal tenga una pendiente muy fuerte. La observación y análisis de la curva de energía específica de la figura 9, para un caudal dado y un canal de sección constante, permite establecer las siguientes características:

- Para un punto  $P$  cualquiera de esta curva, la ordenada representa la profundidad de la lámina de agua,  $y$ , y la abscisa representa el valor correspondiente a la energía específica para dicha profundidad de la lámina de agua  $y$  y la altura o carga de velocidad,  $v^2/2g$ .
- La curva posee dos ramas, la  $AC$  y la  $BC$ . La rama  $AC$  se aproxima asintóticamente al eje horizontal y hacia la derecha mientras que la rama  $BC$  se aproxima a la línea  $OD$  hacia arriba y hacia la derecha.
- La línea  $OD$  pasa a través el origen y tiene un ángulo de inclinación igual a  $45^\circ$ .
- La curva muestra que, para una energía específica dada existen dos posibles profundidades: una profundidad  $y_1$ , de nivel bajo con flujo rápido, y una profundidad  $y_2$  de nivel alto con flujo lento. Es decir, para un mismo valor de energía específica, cuando se transporta caudal constante por un canal, dicho caudal puede transportarse con una profundidad baja o alternativamente con una profundidad alta; estas dos profundidades se conocen como profundidades alternas.
- En el punto  $C$  el valor de energía específica es mínimo y corresponde al flujo crítico y por consiguiente la profundidad se conoce como la profundidad crítica en ella las dos profundidades alternas se convierten en una.
- Si el caudal transportado aumenta la curva de energía específica se desplazará hacia la derecha (curva  $A''B''$ ) y si disminuye su desplazamiento será hacia la izquierda (curva  $A'B'$ ).
- La línea que une todos los puntos con profundidad crítica, de las diferentes curvas de energía específica para diferentes caudales, permite definir dos zonas: la zona superior corresponde a la zona de flujo lento o flujo subcrítico y la zona inferior corresponde a la zona de flujo rápido o flujo supercrítico.

- En la curva de energía específica el segmento de recta paralelo al eje de las abscisas y comprendido entre el eje de las ordenadas y la asíntota inclinada equivale a la carga de presión (profundidad). Por su parte el medido entre la asíntota inclinada y la curva corresponde a la carga cinética.
- En una corriente profunda la energía específica equivale prácticamente a la profundidad:  $E \approx y_2$ .
- En una corriente poco profunda la energía específica equivale prácticamente a la carga cinética:  $E \approx v^2/2g$ .

### 2.1.2. Régimen del flujo

El régimen del flujo se determina por el número de Froude, que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas gravitacionales del movimiento a presión atmosférica, es un valor adimensional que oscila alrededor de la unidad, es decir que el mecanismo principal que sostiene flujo en un canal abierto es la fuerza de gravitación. Por ejemplo, la diferencia de altura entre dos embalses hará que el agua fluya a través de un canal que los conecta. Y está definido como:

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{g\bar{y}}} \quad \begin{cases} \text{si } F_R = 1 & \rightarrow \text{flujo crítico} \\ \text{si } F_R < 1 & \rightarrow \text{flujo subcrítico} \\ \text{si } F_R > 1 & \rightarrow \text{flujo supercrítico} \end{cases} \quad \text{EC. 11}$$

Donde:

- $F_R$  = número de Froude
- $V$  = velocidad del flujo
- $g$  = aceleración debido a la gravedad

- $\bar{y}$  = tirante hidráulico, es igual al área de la sección dividido el ancho superficial o espejo de agua en la sección donde se calcula el número de Froude. El tirante hidráulico fue definido en la ecuación 2 de la siguiente manera:

$$\bar{y} = \frac{A}{T}$$

En el caso de sección rectangular, el espejo de agua es igual al ancho de solera, por lo que el tirante hidráulico es igual al tirante normal del flujo

$$\bar{y} = \frac{by}{b} = y \quad \text{EC. 12}$$

### 2.1.3. Estado crítico del flujo

Por definición se dice que el flujo a superficie libre es crítico cuando las fuerzas de inercia y las fuerzas debidas a la gravedad son iguales, es decir, cuando el número de Froude es igual a la unidad. A partir de esta definición se establece que si el flujo tiene un número de Froude menor que la unidad, el flujo es subcrítico y por tanto la velocidad media del flujo será menor que la velocidad crítica y la profundidad será mayor que la profundidad crítica. Si el flujo tiene un número de Froude mayor que la unidad, el flujo es supercrítico, la velocidad media del flujo será mayor que la velocidad crítica y la profundidad del flujo será menor que la profundidad crítica.

De acuerdo a lo expuesto en la gráfica de energía específica y lo anterior se tienen los siguientes tipos de flujo:

Tabla II. Tipos de flujo y su relación con el número de Froude

Tipos de flujo		
<b>Flujo lento o subcrítico</b>	$Y > Y_c$	$F_R < 1$
<b>Flujo crítico</b>	$Y = Y_c$	$F_R = 1$
<b>Flujo rápido o supercrítico</b>	$Y < Y_c$	$F_R > 1$

Fuente: elaboración propia.

Propiedades acerca de los regímenes del flujo:

- El flujo subcrítico es más profundo que el supercrítico; tiende a ser grueso y lento.
- El flujo supercrítico es más rápido que el subcrítico; tiende a ser delgado y rápido.
- El flujo supercrítico es más “sensible” que el subcrítico: un pequeño cambio en la profundidad produce una gran variación en la velocidad.
- La energía específica en régimen supercrítico tiende a tener, básicamente, un carácter cinético. Mientras que la del subcrítico uno primordialmente potencial<sup>8</sup>.

Como se mencionó anteriormente, para un caudal dado, en el estado crítico del flujo la energía específica es mínima.

Este criterio derivando la ecuación de la energía específica, expresada en función del caudal total (ecuación 8), con respecto a la profundidad de la lámina de agua,  $y$ :

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2}$$

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dy} = 1 - \frac{v^2}{gA} \frac{dA}{dy}$$

<sup>8</sup> CADAVID R., Juan H. *Hidráulica de canales: fundamentos*. p. 84.



El diferencial de área,  $dA$ , en cercanías de la superficie libre es igual a  $Tdy$ , con el ancho  $T$  en la superficie libre. Por tanto  $\frac{dA}{dy} = T$ . Entonces:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{v^2 T}{gA} = 1 - \frac{v^2}{gD}$$

En la expresión anterior  $D$  corresponde a la profundidad hidráulica (ecuación 2), definida como la relación entre el área hidráulica de la sección,  $A$ , y el ancho superior en la superficie libre,  $T$ .

Si la energía específica es mínima, entonces  $\frac{dE}{dy} = 0$  y por tanto de la ecuación anterior se obtiene que:

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

La expresión anterior “establece que en el estado crítico del flujo la altura de velocidad es igual a la mitad de la profundidad hidráulica”<sup>9</sup>. La expresión anterior también se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{v}{\sqrt{gD}} = 1$$

Donde el término de la izquierda corresponde al número de Froude, quedando demostrado, que, para una sección dada de canal, si la energía específica es mínima el flujo es crítico y para que pueda aplicarse en un problema de flujo a superficie libre es necesario tener en cuenta que se tomaron

---

<sup>9</sup> CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 43.

las consideraciones: flujo paralelo o gradualmente variado, pendiente del canal muy baja y factor de corrección de la energía cinética igual a 1.

Si se considera un canal de sección rectangular de ancho  $b$  y se aplica el concepto de caudal unitario, la energía específica queda expresada como se detalló en la ecuación 10:

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

De la misma manera si la expresión al ser derivada con respecto a  $y$  e igualada a cero, para un valor mínimo de la función, permite obtener la siguiente expresión para la profundidad crítica  $y_c$ :

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad \text{EC. 13}$$

Si la energía específica es mínima, la profundidad es crítica y por tanto al reemplazar el término de la altura de velocidad en la expresión de la energía se obtiene que:

$$E_{min} = \frac{3}{2}y_c \quad \text{EC. 14}$$

O que:

$$y_c = \frac{2}{3}E_{min} \quad \text{EC. 15}$$

#### 2.1.4. La energía específica y las transiciones

A pesar de que en general en los problemas prácticos se dice que se tienen canales de grandes longitudes con la sección transversal constante, la realidad es que en la mayoría de los casos es necesario modificar puntualmente dicha sección por diversas situaciones, que muchas veces apunta a salvar un accidente topográfico o a resolver un problema constructivo.

Es muy frecuente que el paso de una sección a otra se realice gradualmente mediante una estructura que se conoce como transición. Esta estructura puede ser muy sencilla o muy compleja, dependiendo de las características de cada sección. Por mencionar las más sencillas podría pensarse que la transición consiste solo en modificar en un pequeño tramo el fondo o solera del canal o que la transición consiste en pasar de una sección rectangular a otra, pero de sección más pequeña. Utilizando el concepto de energía específica es posible analizar el comportamiento del flujo en la zona donde se presenta la variación de la sección<sup>10</sup>.

Una transición se define como “un tramo -generalmente corto- de un canal en el que resulta modificada en forma gradual o abrupta, alguna propiedad geométrica de este. Se trata en particular de la variación de la pendiente, o transición del fondo, y de la sección transversal, llamada transición de la sección. Es de notar que ambos tipos puede darse en forma simultánea”<sup>11</sup>.

Las transiciones merecen especial atención, porque a través de la comprensión de su funcionamiento se desentraña el mecanismo que causa el flujo crítico. El proceso que lleva a este conocimiento involucra una presentación amplia de nuevos conceptos que se incluyen, a menudo, dentro del término genérico de problema de la transición.

---

<sup>10</sup> RODRÍGUEZ DIAZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica experimental*. p. 181.

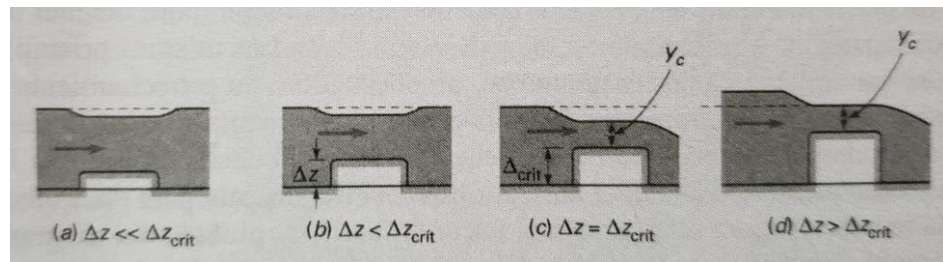
<sup>11</sup> CADAVID R., Juan H. *Hidráulica de canales: fundamentos*. p. 105.

### 2.1.4.1. Obstáculos y estrechamientos

Se examina el caso de un obstáculo en un canal rectangular como se muestra en la figura 10 se supone que el obstáculo posee formas suaves y se desprecia la pérdida de carga.

En la figura 10 (a), se presenta un obstáculo pequeño. Si el flujo aguas arriba del obstáculo es subcrítico, se producirá una ligera depresión de la superficie del agua sobre el obstáculo. El obstáculo (levantamiento local del fondo), dará lugar a una caída en la energía específica  $E$ , debido a que la línea de energía no cambia. Si se reduce  $E$  sin que cambie  $q$ , se reducirá y en una cantidad mayor que la reducción en  $E$ , por lo que deberá producirse una depresión de la superficie del agua por encima del obstáculo. Si se aumenta la altura del obstáculo  $\Delta z$  sin que cambie  $q$ , se producirá una depresión adicional en la superficie del agua por encima del obstáculo, como se observa en la figura 10(b), por la misma razón. Los incrementos adicionales en la altura del obstáculo darán lugar a una depresión cada vez mayor de la superficie del agua por encima del obstáculo hasta que finalmente la profundidad por encima se vuelva crítica como se muestra en la figura 10(c). La altura mínima del obstáculo que dará lugar a la profundidad crítica se denomina altura crítica del obstáculo,  $\Delta z_{crit}$ . Si se aumenta aún más la altura del obstáculo como en la figura 10(d), la profundidad crítica sobre el obstáculo se mantendrá, aumentándose la profundidad aguas arriba del obstáculo hasta que alcance la energía suficiente para fluir con el mismo caudal. Este fenómeno se denomina represamiento, el flujo inmediatamente aguas abajo de  $y_c$  debe ser supercrítico. En tal situación el obstáculo se convierte en un vertedero de pared gruesa, si su superficie superior es plana <sup>12</sup>.

Figura 10. Flujo sobre un obstáculo



Fuente: FRANZINI, Joseph & FINNEMORE, John. *Mecánica de Fluidos con aplicaciones en Ingeniería*. p. 277.

<sup>12</sup> FRANZINI, Joseph & FINNEMORE, John. *Mecánica de Fluidos con aplicaciones en Ingeniería*. p. 277.

Los distintos casos de movimiento que pueden producirse al presentarse la elevación de la solera de un canal son:

- En régimen lento o subcrítico, la elevación de la solera produce una depresión en la superficie libre. [figura 11 (1)].
- En régimen rápido o supercrítico, la elevación de la solera produce una elevación de la superficie libre. [figura 11 (2)].
- Si la elevación de la solera es la crítica, el régimen pasa de subcrítico a supercrítico o de supercrítico a subcrítico, si sucede el segundo caso, se genera el fenómeno del resalto hidráulico. [figura 11 (3)].

En el caso de los estrechamientos en canales rectangulares. De nuevo, se supone que sus formas son suaves para poder despreciar cualquier pérdida de carga que se pueda originar. Los estrechamientos cambian  $q$ , que es el flujo por unidad de ancho.

“Un estrechamiento, que produce un aumento en  $q$ , tiene un efecto similar sobre y al que tiene un obstáculo, haciéndose que se reduzca  $E$ . Si el flujo que se acerca es subcrítico, un estrechamiento pequeño originará una depresión ligera en la superficie del agua del estrechamiento”<sup>13</sup>. Un estrechamiento adicional originará una depresión adicional en la superficie del agua hasta que se produzca el punto de energía mínima es decir el tirante crítico.

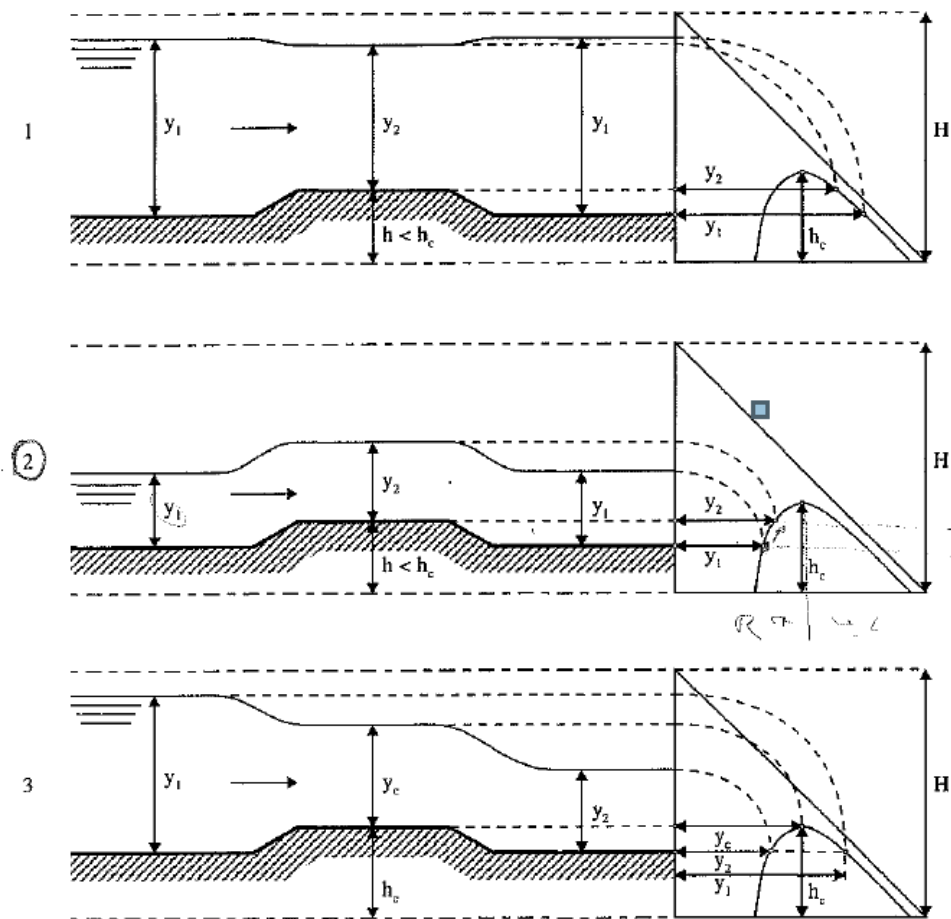
Con mayores estrechamientos, la profundidad mantiene el valor crítico en el estrechamiento. Sin embargo, al contrario de lo que pasa con los obstáculos, la profundidad sigue aumentando en el estrechamiento. Esto se debe a que la profundidad crítica en el estrechamiento depende de  $q$  como lo indica la ecuación 13, aumentándose  $q$  con el estrechamiento. Un aumento en el estrechamiento mas allá del inicio de la profundidad crítica exige que el flujo tenga más energía y esta se proporcionará por represamiento, originando un ascenso aguas arriba en

---

<sup>13</sup> FRANZINI, Joseph & FINNEMORE, John. *Mecánica de Fluidos con aplicaciones en Ingeniería*. p. 278.

la superficie del agua. La anchura máxima (es el decir el estrechamiento mínimo), en él se produce la profundidad crítica se denomina anchura crítica del estrechamiento. En el caso del flujo supercrítico, el flujo sobre obstáculos y a través de estrechamientos se comportará de distinta manera que cuando se trata de flujo subcrítico, de acuerdo con las tendencias indicadas por las zonas supercríticas. Por tanto, si el flujo es supercrítico, la profundidad del agua en obstáculo o estrechamiento aumentara cuando se hace mayor la altura del obstáculo o se aumenta el grado de estrechamiento hasta que se alcanza la profundidad crítica. Más allá de este punto, un aumento en la altura del obstáculo o en el grado de estrechamiento originará represamiento <sup>14</sup>.

Figura 11. **Casos de flujo con la elevación de la solera del canal**



Fuente: LÓPEZ, Lázaro. *Manual de hidráulica*. p. 362.

<sup>14</sup> FRANZINI, Joseph & FINNEMORE, John. *Mecánica de Fluidos con aplicaciones en Ingeniería*. p. 278.

Los distintos casos de movimiento que pueden producirse al presentarse un estrechamiento en la sección de un canal son:

- En régimen lento o subcrítico, un estrechamiento de la sección produce una depresión en la superficie libre. [figura 12(a)].
- En régimen rápido o supercrítico, el estrechamiento de la sección produce una elevación de la superficie libre. [figura 12(b)].
- Si el estrechamiento de la sección alcanza el valor crítico, el régimen pasa de subcrítico a supercrítico o de supercrítico a subcrítico, si sucede el segundo caso, se genera el fenómeno del resalto hidráulico. [figura 12(c)].

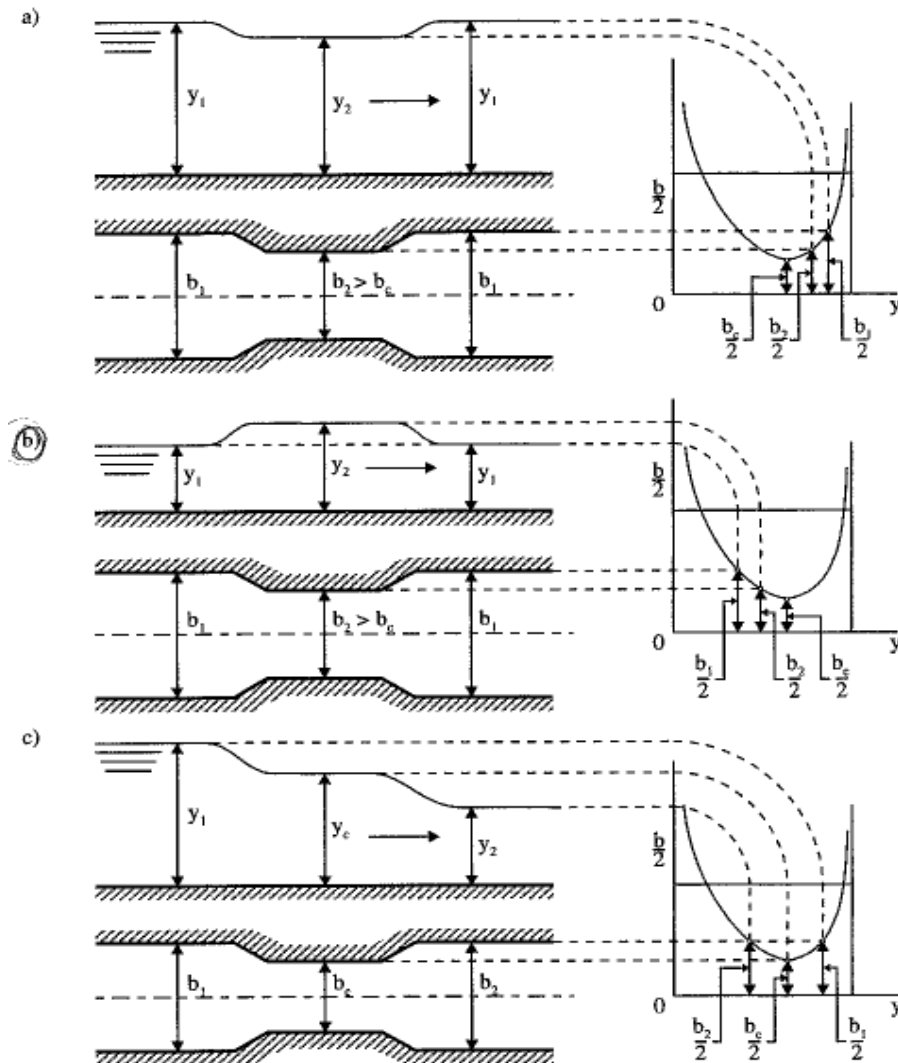
Se puede combinar un obstáculo con un estrechamiento para obtener una sección parecida a un medidor Venturi. Los mismos principios que se han utilizado anteriormente para un obstáculo o un estrechamiento se pueden aplicar a tal situación. Es importante darse cuenta que en la única ecuación donde es preciso resolver (ecuación 10) el obstáculo cambia  $E$  y el estrechamiento cambia  $q$ : el utilizar una ecuación distinta para cada efecto sería incorrecto.

En la práctica las transiciones se presentan de forma combinada, es decir, en forma simultánea existe un escalón o elevación del fondo y un cambio de sección tanto en la forma como en sus dimensiones. El problema de seleccionar las dimensiones mínimas de la sección se puede plantear en canales tanto rectangulares como en no rectangulares y es de gran interés práctico ya que su importancia radica en los costos y en el comportamiento del flujo.

A menudo acontece que una contracción local se tiene que introducir para reducir, por ejemplo, el costo de un puente cuando el canal pasa abajo del camino, o bien, para pasar de un canal trapecial a una alcantarilla de sección circular abajo del

camino. En estos casos resulta esencial conocer la magnitud tolerable de la contracción y la altura máxima del escalón para que no haya alteraciones de las condiciones del flujo aguas arriba, eligiendo la sección más pequeña capaz de sostener el mismo gasto para una energía específica dada, con velocidad de flujo mayor pero un costo menor. Dicha sección será la que opere en régimen crítico como se ha expuesto <sup>15</sup>.

Figura 12. **Casos de flujo con el estrechamiento del ancho de un canal**



Fuente: LÓPEZ, Lázaro. *Manual de hidráulica*. p. 364.

<sup>15</sup> SOTELO AVILA, Gilberto. *Hidráulica de canales*. p. 184.



## 2.2. Fuerza específica

Para la solución de algunos problemas en hidráulica basta con la aplicación conjunta de los principios de continuidad y conservación de la energía. “Un tercer principio, el de conservación del momentum lineal, debe sumársele cuando se requiere calcular fuerzas de interacción entre el agua y una estructura hidráulica”<sup>16</sup>. La presentación estándar de la ecuación de conservación de momentum lineal, como se emplea en la hidráulica de tuberías, se modifica en la de canales cuando es introducida la llamada función de momentum.

### 2.2.1. Momentum del flujo en canales abiertos

Siempre que varía la magnitud o dirección de la velocidad de un cuerpo, se necesita de una fuerza que ocasione el cambio. Se utiliza la segunda ley del movimiento de Newton para expresar el concepto de forma matemática de la siguiente manera:

$$F = ma \qquad \text{EC. 16}$$

La fuerza es igual al producto de la masa y la aceleración. La aceleración se define como la tasa de cambio de la velocidad con respecto al tiempo. La velocidad es una cantidad que posee magnitud y dirección, al variar la magnitud o la dirección se origina una aceleración. De acuerdo a la ecuación 16 se requiere de una fuerza para realizar el cambio, y la hace conveniente para emplearla en cuerpos sólidos, además la masa permanece constante y se puede determinar la aceleración de todo cuerpo.

---

<sup>16</sup> CADAVID R., Juan H. *Hidráulica de canales: fundamentos*. p. 223.

En problemas de movimiento de fluidos, se hace que un flujo continuo experimente la aceleración y esto hace necesario que la ecuación de Newton posea otra forma en ella se expresa la aceleración como la tasa de cambio de la velocidad respecto al tiempo.

$$F = ma = m \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \text{EC. 17}$$

El término  $m/\Delta t$  se interpreta como flujo másico que es la cantidad de masa que fluye en una cantidad de tiempo dada, el flujo másico se relaciona con el flujo volumétrico de la siguiente manera

$$\text{Flujo masico} = \frac{m}{\Delta t} = \rho Q \quad \text{EC. 18}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido y  $Q$  el caudal volumétrico, entonces la ecuación 17 se puede reescribir como:

$$F = \left( \frac{m}{\Delta t} \right) \Delta v = \rho Q \Delta v \quad \text{EC. 19}$$

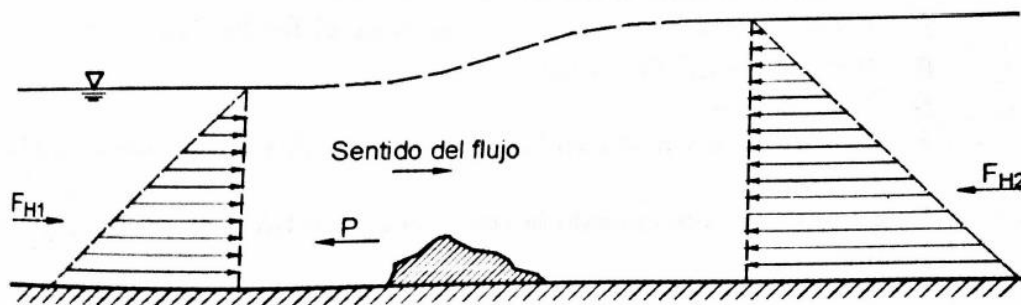
La ecuación 19 es la forma general de la ecuación de fuerza para el flujo de fluidos, involucra la velocidad y el caudal volumétrico, datos que por lo general son conocidos en un sistema de fluido; la ecuación también se le llama momentum del flujo que pasa a través de una sección del canal por unidad de tiempo.

### 2.2.2. Función momentum o fuerza específica

De acuerdo con la segunda ley de Newton, el cambio en la cantidad de momentum por unidad de tiempo para un volumen de agua en un canal es igual a la resultante de todas las fuerzas que actúan en dicho volumen.

Se considera para el estudio de la fuerza específica un volumen de control como en la figura 13 en la que se representa un corte longitudinal de un tramo de canal donde “se pueden o no presentar pérdidas de energía y donde se pueden tener o no un obstáculo que genere una fuerza  $P$ . De la misma manera, la magnitud de las profundidades de la lámina de agua en una de las secciones puede tomar valor alto o bajo, indistintamente”<sup>17</sup>.

Figura 13. **Esquema para el análisis de la ecuación de cantidad de movimiento en un flujo a superficie libre**



Fuente: RODRÍGUEZ, Héctor. *Hidráulica experimental*. p.195.

En la figura  $P$  representa el valor de la fuerza que un obstáculo cualquiera ejerce sobre el flujo y es la utilizada en la ecuación de cantidad de movimiento.

<sup>17</sup> RODRÍGUEZ DIAZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica experimental*. p. 195.

El análisis del esquema permite el planteamiento de algunos casos particulares que pueden ser tratados con el principio del momentum:

- Pérdidas de energía despreciables ( $h_r = 0$ ) y fuerza de un obstáculo diferente de cero ( $P \neq 0$ ). Esta situación corresponde al caso del empuje una compuerta impone al flujo.
- Presencia de pérdidas de energía significativas ( $h_r \neq 0$ ) y no existencia de una fuerza debida a un obstáculo ( $P = 0$ ). En estas condiciones existe un cambio de régimen supercrítico a subcrítico, es decir, un resalto hidráulico sobre un canal horizontal sin obstáculos ni fricción.
- Presencia de pérdidas de energía significativas ( $h_r \neq 0$ ) y existencia de una fuerza debida a un obstáculo ( $P \neq 0$ ). Esta situación corresponde al caso que se denomina resalto hidráulico que se forma con la ayuda de un obstáculo.

Si se desprecian los efectos producidos por la fricción, la aplicación del principio de la cantidad de movimiento expresado en la ecuación 19 sobre el volumen de control de la Figura 13, entre las secciones 1 y 2, es:

$$F_{H1} - F_{H2} - P = \rho Q (V_2 - V_1)$$

Donde:

- $F_{H1} = \gamma \bar{y}_1 A_1$  = fuerza debida a la presión hidrostática actuando en la sección 1.
- $\bar{y}_1$  = distancia desde la superficie libre al centroide del área en la sección 1.
- $A_1$  = área de la sección transversal en 1.
- $F_{H2} = \gamma \bar{y}_2 A_2$  = fuerza debida a la presión hidrostática actuando en la sección 2.

- $\bar{y}_2$  = distancia desde la superficie libre al centroide del área en la sección 2.
- $A_2$  = área de la sección transversal en 2.
- $P$  = fuerza ejercida por el obstáculo sobre el fluido.
- $\rho$  = densidad del fluido.
- $Q$  = caudal.
- $V_1, V_2$  = velocidad media en las secciones 1 y 2, respectivamente.

$F_{H1}$  y  $F_{H2}$  son las presiones resultantes que actúan en las secciones 1 y 2 respectivamente, “para un flujo paralelo o gradualmente variado estos valores en la ecuación de momentum pueden calcularse suponiendo la distribución hidrostática de presiones”<sup>18</sup>.

Despejando  $P$  y presentando la ecuación en unidades de energía específica, resulta:

$$\frac{P}{\rho g} = \left( \frac{Q^2}{g A_2} + \bar{y}_2 A_2 \right) - \left( \frac{Q^2}{g A_1} + \bar{y}_1 A_1 \right) \quad \text{EC. 20}$$

En la ecuación cada uno de los términos entre paréntesis se denomina función de momento o fuerza específica,  $M$  y son análogos, pueden expresarse para cualquier sección del canal mediante una función general.

$$M = \frac{Q^2}{g A} + \bar{y} A \quad \text{EC. 21}$$

“Esta función consta de dos términos. El primer término es el momentum del flujo que pasa a través de la sección del canal por unidad de tiempo y por unidad de peso del agua, y el segundo es la fuerza por unidad de peso del

---

<sup>18</sup> CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 49.

agua”<sup>19</sup>. Como ambos términos en esencia son fuerza por unidad de peso del agua, su suma puede denominarse momentum específico o fuerza específica y realmente es una cantidad vectorial asociada con una sección de flujo.

Con esta definición la ecuación 20 se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\frac{P}{\gamma} = M_2 - M_1 \quad \text{EC. 22}$$

En el caso particular de un canal con sección rectangular, el término correspondiente a la fuerza específica puede expresarse en función del caudal unitario  $q$ , y se expresa de la siguiente manera:

$$M = \frac{q^2}{g y} + \frac{y^2}{2} \quad \text{EC. 23}$$

De la exposición anterior se exponen las siguientes conclusiones:

- La ecuación general de momentum se aplica igualmente al cambio de régimen subcrítico a supercrítico o viceversa, exista o no pérdida.
- El cambio de régimen subcrítico a supercrítico ocurre con frecuencia en forma gradual, sin resalto hidráulico y sin pérdida de energía apreciable. El cambio de régimen supercrítico a subcrítico se produce de manera brusca por medio de la formación del resalto hidráulico y con pérdida de energía apreciable.
- El resalto hidráulico se produce en el sitio en que se iguala el momentum de las secciones antes y después del mismo. Si el conjugado menor  $y_1$

---

<sup>19</sup> CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 53.

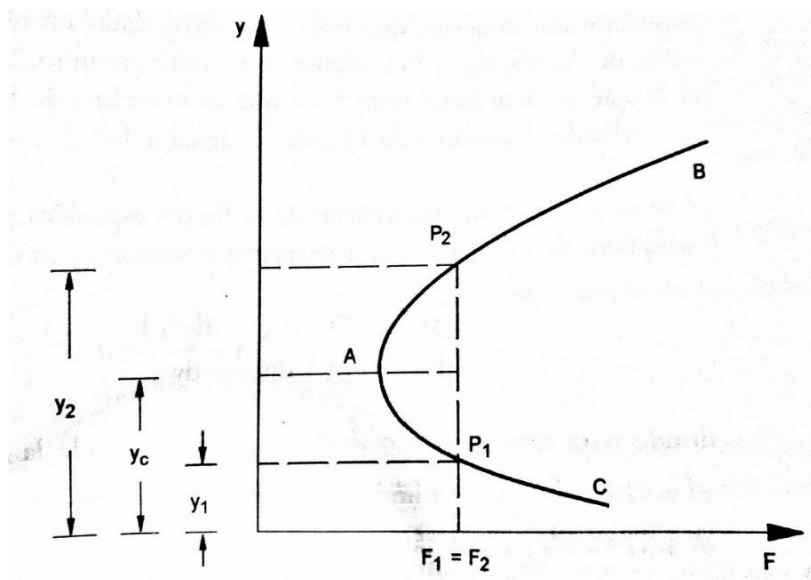
aumenta, el mayor  $y_2$  disminuye o viceversa. Este hecho es importante en la localización del resalto hidráulico.

- El resalto hidráulico se forma en el sitio elegido, con el auxilio de algún obstáculo que lo controle como una compuerta.

### 2.2.3. Curva de fuerza específica

La curva de fuerza específica se obtiene al graficar, para una sección de canal y un caudal determinado constante, la profundidad de la lámina de agua contra el respectivo valor de la fuerza específica. “Es importante considerar que para una sección de canal y un caudal dado, es posible que éste se transporte con diferentes profundidades de la lámina de agua”<sup>20</sup>.

Figura 14. Curva de fuerza específica



Fuente: RODRÍGUEZ, Héctor. *Hidráulica experimental*. p.197.

<sup>20</sup> RODRÍGUEZ DIAZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica experimental*. p. 197

La observación de la curva permite concluir que tiene un punto A, en el que el valor de la fuerza específica es mínimo y a partir del cual se desprenden dos ramas, AB y AC. La rama AC se aproxima asintóticamente al eje horizontal hacia la derecha, cuando el caudal se transporta con profundidades cada vez más pequeñas. La rama AB aumenta hacia arriba y se extiende indefinidamente hacia la derecha cuando cada vez es mayor que la profundidad de la lámina de agua. Si se toma un valor cualquiera de la fuerza específica (excepto su valor mínimo), la curva muestra que le corresponde dos profundidades posibles,  $y_1$  y  $y_2$ . Estas dos profundidades se conocen como inicial y seciente de un fenómeno local que se denomina resalto hidráulico y significa que las fuerzas específicas en las dos secciones son iguales,  $M_1 = M_2$  o  $\frac{P}{\gamma} = M_1 - M_2 = 0$ , considerando que las fuerzas externas, la fricción y el peso específico del agua en el tramo entre las dos secciones sean insignificantes <sup>21</sup>.

El valor mínimo de la función momentum en el punto A puede calcularse si se supone que existe un flujo paralelo y una distribución uniforme de velocidad, al tomar la primera derivada de  $M$  con respecto a  $y$  e igualar la expresión a cero:

$$\frac{dM}{dy} = -\frac{Q^2}{g A^2} \frac{dA}{dy} + \frac{d(\bar{y} A)}{dy} = 0$$

Para una variación  $dy$  de la profundidad de la lámina de agua, el cambio correspondiente  $d(\bar{y} A)$  en el momento estático del área mojada alrededor de la superficie libre es igual a  $d(\bar{y} A) = [A(\bar{y} + dy) + T (dy)^2/2] - \bar{y} A$ . Al no considerar el diferencial de orden mayor, es decir  $dy^2 = 0$ , el cambio en el momento estático se convierte en  $d(\bar{y} A) = A dy$ , y por tanto se puede escribir que:

$$\frac{dM}{dy} = -\frac{Q^2}{g A^2} \frac{dA}{dy} + A = 0$$

Si finalmente se reemplaza el término  $\frac{dA}{dy} = T$ ,  $\frac{Q}{A} = V$  y  $AT = D$ , se obtiene que:

---

<sup>21</sup> RODRÍGUEZ DIAZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica experimental*. p. 197.



$$\frac{V^2}{2g} = \frac{D}{2}$$

O que:

$$\frac{V}{\sqrt{gD}} = 1$$

Por consiguiente, queda demostrado que la profundidad correspondiente al valor mínimo de la fuerza específica es la profundidad crítica. También puede establecerse que en el estado crítico del flujo la fuerza específica es mínima para un caudal determinado.

En el caso de la sección rectangular el valor de  $D$ , profundidad hidráulica, resulta ser igual al valor de  $y$ , profundidad del flujo. Igualmente, esta última expresión, en el caso de una sección rectangular, se puede escribir en términos del caudal unitario  $q$  y puede quedar expresada como  $q = \sqrt{g y_c^3}$ .

Demostrado lo anterior, se concluye que la pata superior o ascendente  $AB$  de la curva donde  $y > y_c$  se aplica a flujo subcrítico y la inferior o descendente  $AC$  donde  $y < y_c$  y corresponde a flujo supercrítico.

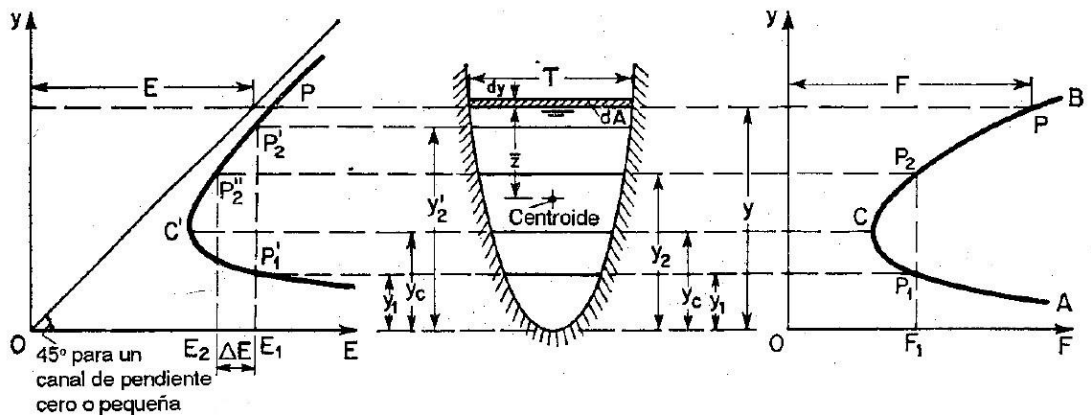
#### **2.2.4. Aplicaciones prácticas**

Si se compara la curva de energía específica con la curva de fuerza específica para la sección de un canal como se muestra en la figura 15:

Para una determinada energía específica  $E_1$ , la curva de energía específica indica dos posibles profundidades, es decir, un nivel bajo  $y_1$  en la región de flujo supercrítico y un nivel alto  $y_2'$  de flujo subcrítico. Para un determinado valor de fuerza específica  $F_1$ , la curva de fuerza específica también indica dos profundidades posibles, es decir una profundidad inicial  $y_1$  en la región supercrítica y una profundidad secuencia  $y_2$  en la región de flujo subcrítico. Se supone que el nivel bajo y la profundidad inicial son ambas iguales a  $y_1$ . Luego,

las dos curvas indican de manera conjunta que la profundidad seciente  $y_2$  es siempre menor que el nivel alto  $y_2'$ . Además, la curva de energía específica muestra que el contenido de energía  $E_2$  para la profundidad  $y_2$  es menor que el contenido de energía  $E_1$  para la profundidad  $y_2'$ . Por consiguiente, para mantener un valor constante de  $F_1$  la profundidad de flujo debe cambiar de  $y_1$  a  $y_2$  con el costo de perder cierta cantidad de energía, que es igual a  $E_1 - E_2 = \Delta E$ . Un ejemplo de esto es el resalto hidráulico en un fondo horizontal, en el cual las fuerzas específicas antes y después del resalto son iguales y la pérdida de energía es una consecuencia del fenómeno. (...) Nótese en este punto, sin embargo, que las profundidades  $y_1$  y  $y_2'$  mostradas en la curva de energía específica son las profundidades alternas; en tanto que las profundidades  $y_1$  y  $y_2$  mostradas en la curva de fuerza específica son las profundidades inicial y seciente de un resalto hidráulico, respectivamente <sup>22</sup>.

Figura 15. Comparación curva energía específica y fuerza específica



Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 54.

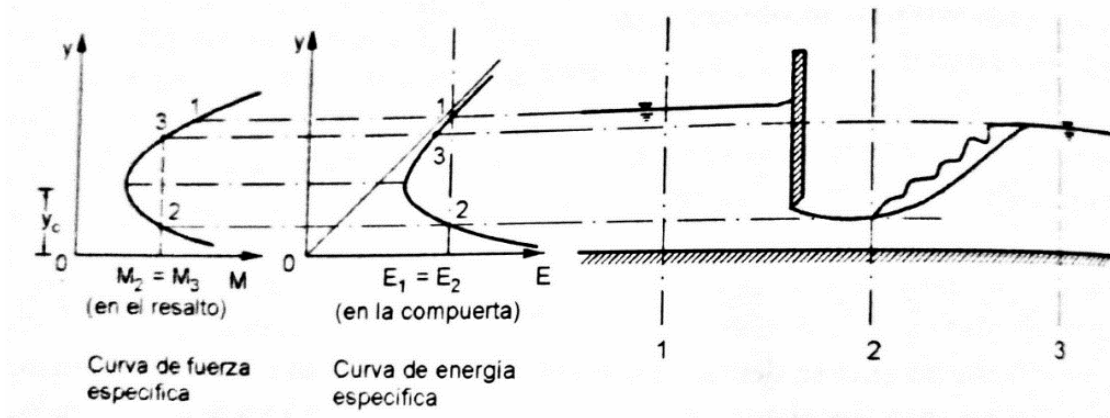
En la figura 16 un análisis utilizando los conceptos y gráficos de energía específica y fuerza específica en una compuerta ubicada en un canal en la que se definen tres secciones: una sección 1 antes de la compuerta, una sección 2 justo después de la compuerta y una sección 3 aguas debajo de la misma.

Al realizar los análisis sobre los diferentes volúmenes de control se puede concluir que para el volumen de control definido entre las secciones 1 y 2, las

<sup>22</sup> CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 55.

energías específicas en estas secciones son iguales pero las fuerzas específicas no y para el caso del volumen de control definido entre las secciones 2 y 3, las fuerzas específicas en estas secciones son iguales pero las energías específicas no.

Figura 16. **Comportamiento de la energía específica y la fuerza específica en el flujo a través de una compuerta y en el desarrollo de un resalto hidráulico**

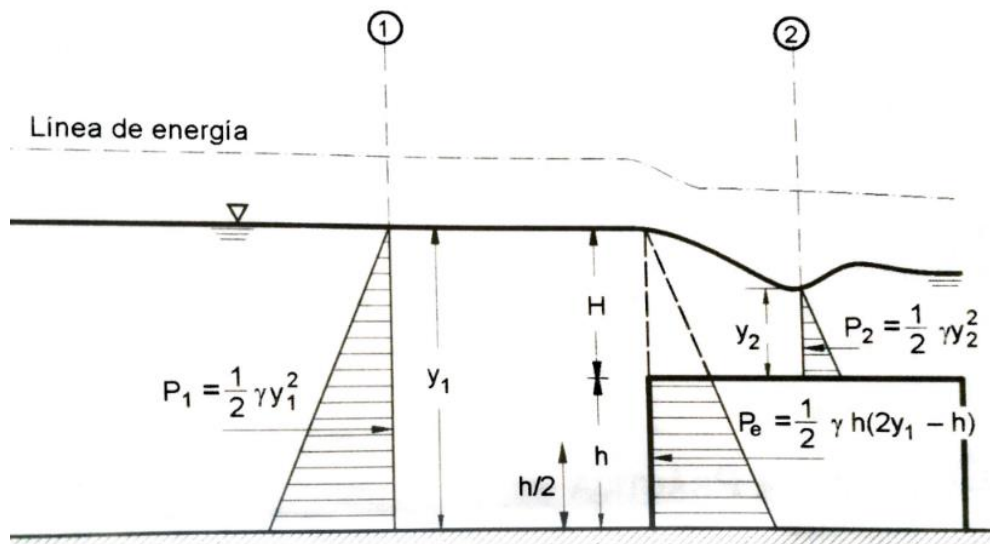


Fuente: RODRÍGUEZ, Héctor. *Hidráulica experimental*. p. 200.

Las situaciones anteriores son ilustradas, como se muestra en la figura anterior, mediante las curvas de energía y fuerza específica. Con estos gráficos se puede concluir que si las profundidades son conjugadas o recuentes (secciones 2 y 3, con la formación del resalto), una debe ser supercrítica y la otra subcrítica. Igualmente, en este caso si permanece el caudal constante y la profundidad alta se incrementa, necesariamente la profundidad baja debe decrecer si se mantiene el resalto hidráulico.

Otro análisis utilizando los conceptos de fuerza específica se puede realizar en el laboratorio cuando en el fondo de un canal rectangular se coloca como obstáculo un prisma en forma de paralelepípedo, simulando un vertedero de pared gruesa como se ilustra en la figura 17.

Figura 17. **Principio de momentum aplicado al flujo sobre un vertedero de pared gruesa**



Fuente: RODRÍGUEZ, Héctor. *Hidráulica experimental*. p. 201.

Para este problema se hacen las siguientes suposiciones:

- Las fuerzas de fricción  $F_f'$  y  $F_f''$  son insignificantes;
- La profundidad  $y_2$  es la profundidad mínima sobre el vertedero;
- En las secciones del canal bajo consideración existe flujo paralelo; y
- La presión del agua  $P_e$  sobre la superficie del vertedero es igual a la presión hidrostática total medida por debajo del nivel de la superficie de agua aguas arriba<sup>23</sup>.

<sup>23</sup> CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 52.

“El análisis teórico utilizando la segunda ley de Newton permite obtener una expresión para el caudal en función de la altura de la lámina de agua por encima del vertedero”<sup>24</sup>. En este análisis, la fuerza por unidad de ancho sobre la pared aguas arriba del vertedero se ha determinado de la siguiente manera:

$$P_e = \gamma \bar{h} A = \gamma \left( y_1 - \frac{h}{2} \right) \quad \text{EC. 24}$$

La ecuación anterior para facilitar el cálculo se puede reescribir de la siguiente manera:

$$P_e = \frac{\gamma h}{2} (2y_1 - h) \quad \text{EC. 25}$$

La exactitud de la última suposición ha sido verificada de manera experimental. Si se aplica la ecuación de momentum al cuerpo de agua contenido entre la sección de aproximación 1 aguas arriba y la sección 2 aguas abajo en la sección de profundidad mínima en la parte superior del vertedero, se puede escribir la siguiente expresión en función del caudal por unidad de ancho  $q$ :

$$\frac{\gamma y_1^2}{2} - \frac{\gamma y_2^2}{2} - \frac{\gamma h}{2} (2y_1 - h) = \frac{\gamma q}{g} \left( \frac{q}{y_2} - \frac{q}{y_1} \right)$$

Para despejar  $q$ , y de acuerdo con “algunos experimentos hechos por Doeringsfeld y Barker han demostrado que en promedio  $y_1 - h = 2y_2$ ”<sup>25</sup>. En este caso, la anterior ecuación puede simplificarse y resolverse para  $q$ .

$$q = 0.433 \sqrt{2g} \left( \frac{y_1}{y_1+h} \right)^{1/2} H^{2/3} \quad \text{EC. 26}$$

<sup>24</sup> RODRÍGUEZ DIAZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica experimental*. p. 201.

<sup>25</sup> CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 52.

### 2.3. Flujo crítico

El estado crítico del flujo se define como la condición para la cual el número de Froude es igual a la unidad. Una definición más común es aquella que dice que es el estado del flujo y para él la energía específica toma un valor mínimo, para un caudal dado. Se puede concluir que si se tiene una energía específica dada, el caudal máximo se presentará cuando dicha energía corresponda a una energía específica mínima y la profundidad de la lámina de agua sea la profundidad crítica.

Así mismo, para el estado crítico del flujo de una sección dada de canal se han definido varias características importantes que se pueden resumir así:

- La energía específica es mínima para un caudal determinado.
- El caudal es máximo para una determinada energía específica.
- La fuerza específica es mínima para un caudal determinado.
- La altura de velocidad es igual a la mitad de la profundidad hidráulica en un canal de baja pendiente.
- El número de Froude es igual a la unidad.
- La velocidad de flujo en un canal de baja pendiente con distribución uniforme de velocidades es igual a la celeridad de pequeñas ondas gravitatorias en aguas poco profundas causadas por perturbaciones locales<sup>26</sup>.

Los análisis sobre el estado crítico de flujo se han referido principalmente a una sección particular de canal, conocida como sección crítica. Si el estado crítico del flujo existe a través de toda la longitud del canal o a lo largo de un tramo de este, el flujo en el canal es un flujo crítico. Dado que la profundidad del flujo crítico depende de los elementos geométricos de la sección del canal cuando el caudal es constante, la profundidad crítica en un canal prismático con

---

<sup>26</sup> CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 62.

pendiente uniforme será la misma en todas las secciones, y el flujo crítico en un canal prismático deberá ser por consiguiente flujo uniforme. Para esta condición, la pendiente del canal que mantiene un determinado caudal con una profundidad uniforme y crítica se conoce como pendiente crítica  $S_c$ .

Una pendiente del canal menor que la pendiente crítica producirá un flujo más lento de naturaleza subcrítica para el caudal determinado y se conoce como pendiente suave o subcrítica. Una pendiente mayor que la pendiente crítica producirá un flujo más rápido de naturaleza supercrítica y se conoce como pendiente empinada o supercrítica.

Un canal o una sección de él está trabajando bajo un régimen crítico, cuando se presentan alguna de estas situaciones:

- “Posee la energía específica mínima para un caudal dado, o
- Posee el caudal máximo para una energía específica dada, o
- Posee la fuerza específica mínima para un caudal dado”<sup>27</sup>.

De lo anterior, los términos de régimen crítico pueden definirse como:

Caudal crítico: es el caudal máximo para una energía específica determinada, o el caudal que se producirá con una energía específica mínima.

Tirante crítico: es el tirante que existe cuando el caudal es máximo, para una energía específica determinada, o el tirante al que ocurre un caudal determinado con la energía específica mínima.

Velocidad crítica: es la velocidad media cuando el caudal es crítico.

Pendiente crítica: es el valor particular de la pendiente del fondo del canal, para la cual este conduce un caudal  $Q$  en régimen uniforme y con energía específica mínima, o sea, que en todas las secciones se tiene el tirante crítico, formándose el flujo crítico uniforme.

Régimen subcrítico: son las condiciones en las que los tirantes son mayores que los críticos, las velocidades menores que las críticas y los números de Froude menores que 1. Es un régimen lento, tranquilo, fluvial, adecuado para canales principales o de navegación.

---

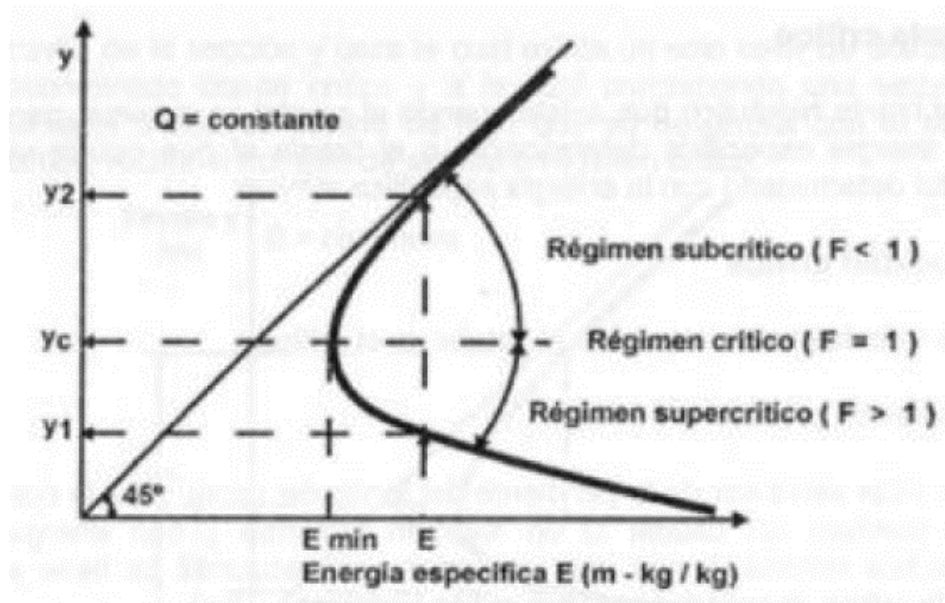
<sup>27</sup> VILLÓN, Máximo G. *Hidráulica de canales*. p. 150.

Régimen supercrítico: son las condiciones hidráulicas en las que los tirantes son menores que los críticos, las velocidades mayores que las críticas y los números de Froude mayores que 1. Es un régimen rápido, torrencial, pero perfectamente estable, puede usarse en canales revestidos<sup>28</sup>.

En la figura 18 se muestra una curva de energía específica para caudal constante, en la zona superior de la curva corresponde al flujo subcrítico ( $y_2 > y_c$ ) y la inferior al flujo supercrítico ( $y_1 < y_c$ ). En esta curva se debe destacar que para el tirante crítico la energía específica es mínima.

En la figura 19 se muestra una curva de caudal contra tirante. Esta curva es útil en aplicaciones en que corresponde a caudales variables, con energía constante, como sucede en los vertederos laterales.

Figura 18. **Curva de energía específica para caudal constante**

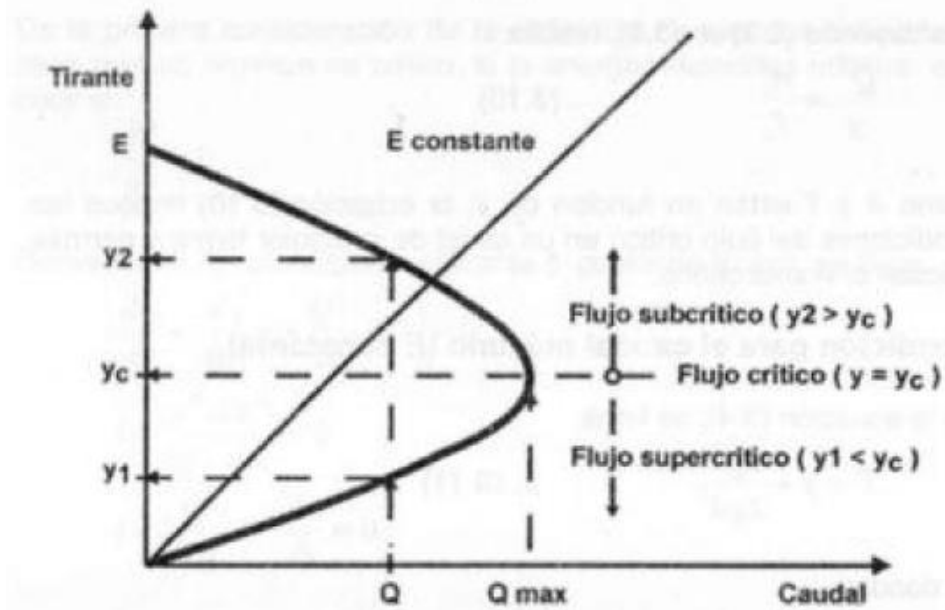


Fuente: VILLÓN, Máximo. *Hidráulica de canales*. p. 152.

<sup>28</sup> VILLÓN, Máximo G. *Hidráulica de canales*. p. 151.



Figura 19. **Curva caudal contra tirante para energía específica constante**



Fuente: VILLÓN, Máximo. *Hidráulica de canales*. p. 156.

En la figura se observa que existen dos valores de  $y$  para cada valor de  $Q$ , excepto en el de caudal máximo. Además, se observa que en una sección transversal de canal alcanza su máxima capacidad de descarga cuando el tirante es igual al crítico.

### 2.3.1. Controles, ocurrencia de flujo crítico

Otro problema interesante en el flujo a superficie libre es el siguiente: si se conoce un valor del caudal unitario  $q$ , ¿Qué factores determinan la energía específica,  $E$ , y consecuentemente la profundidad,  $y$ ; igualmente, si se conoce la energía específica,  $E$ , ¿Qué factores determinan  $q$ ? La respuesta a estas preguntas es que hay diferentes mecanismos de control que pueden definir que profundidad se debe tener para un cierto caudal y viceversa.

La sección de control en un canal es un concepto que se define utilizando la profundidad crítica, pero también puede definirse de otras maneras. “Una sección de control es el área en la cual se establece una condición única del flujo, o más específicamente es donde ocurre una relación entre el caudal y la profundidad del flujo. Por esta razón este sitio es siempre muy apropiado para la localización de una estación de medición y para la elaboración de una curva de profundidades”<sup>29</sup>.

En condiciones de flujo crítico se pueden establecer una relación única de profundidad contra el caudal que está representada por dos ecuaciones  $A\sqrt{D}$  y  $\frac{Q}{\sqrt{g}}$ , que definen el factor  $Z$  para el cálculo del flujo crítico. Estas dos ecuaciones muestran que la relación entre profundidad y caudal es independiente de la rugosidad del canal, pendiente y otras circunstancias que no se pueden controlar.

La sección de control, como su nombre lo indica controla el flujo y restringe la transición del efecto de un cambio en las condiciones del flujo, ya

---

<sup>29</sup> RODRÍGUEZ DIAZ, Héctor Alfonso. Hidráulica experimental. p. 213.

sea aguas arriba o aguas abajo. Por tanto, existen ciertas condiciones que tienden a producir un flujo crítico.

Por ejemplo, para el flujo a través de una compuerta, con unas condiciones dadas, existe una relación entre  $q$  y su profundidad aguas arriba, y similarmente para la profundidad aguas abajo. Los vertederos de descarga libre y los vertederos acompañados de una descarga rápida son otros ejemplos de esta clase de mecanismos. Igualmente se puede decir que la resistencia al flujo debida a la rugosidad del fondo del canal tiene algún efecto.

De hecho, las condiciones del flujo en un canal en particular están sustancialmente determinadas por los controles que están operando en el mismo. La definición o establecimiento de un “control” en un canal determina una relación directa caudal-profundidad de la lámina de agua y es un parámetro muy importante en el estudio del flujo a superficie libre.

Particularmente se podría decir que existen condiciones en un canal que tienden a producir un flujo crítico y que, en consecuencia, si este flujo se da es porque existe un control. Para establecer la naturaleza de estas condiciones se puede considerar el flujo a superficie libre en un canal de sección rectangular, como el del laboratorio, pero asumiendo que no se presentan pérdidas de energía.

Para la energía total,  $H$ , y con el caudal unitario,  $q$ , constante, se puede escribir:

$$H = z + y + \frac{q^2}{2gy^2} = z + E = \text{constante} \quad \text{EC. 27}$$

Donde

- $H$  = energía total en una sección dada de canal con respecto a un nivel de referencia.
- $Z$  = distancia entre el nivel de referencia y la solera o fondo del canal.
- $y$  = profundidad de la lámina de agua.
- $\frac{q^2}{2gy^2}$  = altura de velocidad para un canal de sección rectangular constante.

Al derivar con respecto a  $x$ , que representa la distancia a lo largo del canal:

$$\frac{dE}{dx} + \frac{dz}{dx} = 0$$

Expresión que puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\frac{dE}{dx} \frac{dy}{dx} + \frac{dz}{dx} = 0$$

Por otra parte, se ha establecido:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - F_R^2$$

Donde  $F_R$  corresponde al número de Froude. Empleando la ecuación anterior es posible escribir la ecuación de la energía diferenciada como:

$$\frac{dy}{dx} (1 - F_R^2) + \frac{dz}{dx} = 0 \quad \text{EC. 28}$$

Esta ecuación muestra la importancia del número de Froude y permite deducir lo que previamente se explicó mediante la curva de energía específica.

De la ecuación 28 se pueden considerar una serie de subcasos:

- Si  $dz/dx > 0$  y  $F_R < 1$ , entonces  $(1 - F_R^2) > 0$  y  $dy/dx$  debe ser menor que cero. Por lo tanto, el tirante del flujo disminuye al incrementarse  $x$ .
- Si  $dz/dx > 0$  y  $F_R > 1$ , entonces  $(1 - F_R^2) < 0$  y  $dy/dx$  debe ser mayor que cero. Por lo tanto, bajo estas condiciones el tirante del flujo incrementa al incrementarse  $x$ .
- Si  $dz/dx < 0$  y  $F_R < 1$ , entonces  $(1 - F_R^2) > 0$  y  $dy/dx$  debe ser mayor que cero. Por lo tanto, bajo estas condiciones el tirante del flujo incrementa al incrementarse  $x$ .
- Si  $dz/dx < 0$  y  $F_R > 1$ , entonces  $(1 - F_R^2) < 0$  y  $dy/dx$  debe ser menor que cero. Por lo tanto, bajo estas condiciones el tirante del flujo disminuye al incrementarse  $x$ .

Cuando  $dz/dx = 0$  se presenta un caso muy interesante y común. Bajo esta condición la ecuación 28 resulta:

$$\frac{dy}{dx}(1 - F_R^2) = 0$$

Entonces,  $dy/dx = 0$  o  $F_R^2 = 1$ . Esta situación puede ocurrir en caídas rápidas o en vertederos de cresta ancha. Por observación se sabe que en estas situaciones  $dy/dx \neq 0$ , y por lo tanto,  $F_R^2 = 1$ . Una sensata aplicación de estos resultados puede dar un efectivo método para medida de flujo. En tal caso, el tirante crítico no ocurre exactamente en la caída libre, pero sí ligeramente antes de este punto.

A partir de la misma ecuación de energía (ecuación 27), es posible realizar análisis similares cuando se presenta una variación del ancho de la sección del canal.

En este caso si se asume un canal rectangular horizontal con su ancho,  $b$ , variable y se deriva con respecto a  $x$ , tomando  $z$  constante y  $q$  variable se puede decir que:

$$\frac{dy}{dx} - \frac{q^2}{gy^3} \frac{dy}{dx} + \frac{q}{gy^2} \frac{dq}{dx} = 0$$

$$\frac{dy}{dx} \left( 1 - \frac{q^2}{gy^3} \right) + \frac{q}{gy^2} \frac{dq}{dx} = 0$$

De la ecuación de continuidad:  $qb = Q = \text{constante}$  entonces

$$b \frac{dq}{dx} + q \frac{db}{dx} = 0$$

Si se elimina  $dq/dx$  de la ecuación de energía diferenciada:

$$\frac{dy}{dx} (1 - F_R^2) + \frac{q}{gy^2} \frac{q}{b} \frac{db}{dx} = 0$$

$$\frac{dy}{dx} (1 - F_R^2) + F_R^2 \frac{y}{b} \frac{db}{dx} = 0 \quad \text{EC. 29}$$

La ecuación anterior permite concluir que a la salida de un lago el flujo crítico se presentara cuando  $db/dy = 0$ , es decir, en una sección de máxima contracción horizontal. Se puede demostrar también que el flujo crítico no ocurrirá en una sección de ancho máximo sino cuando este valor sea mínimo.

Las derivaciones de la ecuación de energía pueden generalizarse a cualquier sección transversal de canal para mostrar que el flujo crítico tiende a ocurrir en aquella sección de máxima contracción, suponiendo que no existen efectos restrictivos en las condiciones normales del flujo.

De la ecuación 29 se pueden considerar una serie de subcasos:

- Si  $db/dx > 0$  y  $F_R < 1$ , entonces  $(1 - F_R^2) > 0$  y  $dy/dx$  debe ser mayor que cero. En este caso el tirante del flujo incrementa al incrementarse  $x$ .
- Si  $db/dx > 0$  y  $F_R > 1$ , entonces  $(1 - F_R^2) < 0$  y  $dy/dx$  debe ser menor que cero. En este caso el tirante del flujo disminuye al incrementarse  $x$ .
- Si  $db/dx < 0$  y  $F_R < 1$ , entonces  $(1 - F_R^2) > 0$  y  $dy/dx$  debe ser menor que cero. Bajo estas condiciones, el tirante del flujo disminuye al incrementarse  $x$ .
- Si  $db/dx < 0$  y  $F_R > 1$ , entonces  $(1 - F_R^2) < 0$  y  $dy/dx$  debe ser mayor que cero. Bajo estas condiciones, el tirante del flujo incrementa al incrementarse  $x$ .

### 2.3.2. Aplicaciones prácticas

En el diseño de canales se recomienda que el flujo que se desarrolle no corresponda a un flujo crítico o muy cerca de él, porque resulta ser un flujo inestable. Esto se debe a que un pequeño cambio de la energía específica en el estado crítico o cerca de él produce un cambio importante en la profundidad de la lámina de agua. Al modificarse la energía específica el flujo adoptara, dependiendo de la condición particular, una profundidad alterna alta o baja, que obliga al desarrollo de un flujo subcrítico o supercrítico.

Si al realizar el diseño de un canal se obtiene que la profundidad a lo largo de un gran tramo del canal es igual o muy cerca a la profundidad crítica convendría modificar cualquiera de los parámetros (geometría, pendiente longitudinal, rugosidad) con el propósito de modificar este comportamiento, pues en estas condiciones la superficie libre resulta ser inestable y ondulada como consecuencia de las pequeñas variaciones de la energía específica producidas por cambios de la rugosidad, la sección transversal, la pendiente o un pequeño obstáculo.

Esta situación inestable del estado crítico del flujo es de singular importancia en los flujos desarrollados en los cauces naturales, donde por las condiciones geomorfológicas existentes se pueden presentar diferentes tipos de flujo para una misma sección transversal (por ejemplo, una sección transversal donde su parte central presenta una barra de sedimentos), como subcríticos, críticos o supercríticos, estableciendo diferentes condiciones de transporte de sedimentos o erosión<sup>30</sup>.

---

<sup>30</sup> RODRÍGUEZ DIAZ, Héctor Alfonso. Hidráulica experimental. p. 212.





### 3. ENSAYOS

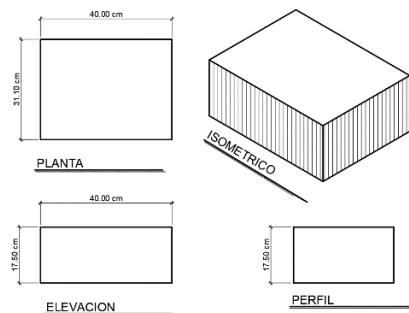
#### 3.1. Ensayo de fuerza específica

Se muestra el procedimiento de diseño y construcción del modelo para el estudio de la fuerza específica, así como el procedimiento experimental, datos, cálculos y graficas obtenidas.

##### 3.1.1. Diseño y construcción de prisma para estudio de la fuerza específica

Para el ensayo de la fuerza específica se emplea un “prisma rectangular”<sup>31</sup>, el modelo fue fabricado con planchas pegadas de poliestireno expandido (EPS), de 1 ½” de espesor en su centro, esto con el fin de disminuir el peso final del prisma.

Figura 20. Dimensiones del prisma rectangular



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2019.

<sup>31</sup> RODRÍGUEZ DIAZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica experimental*. p. 202.

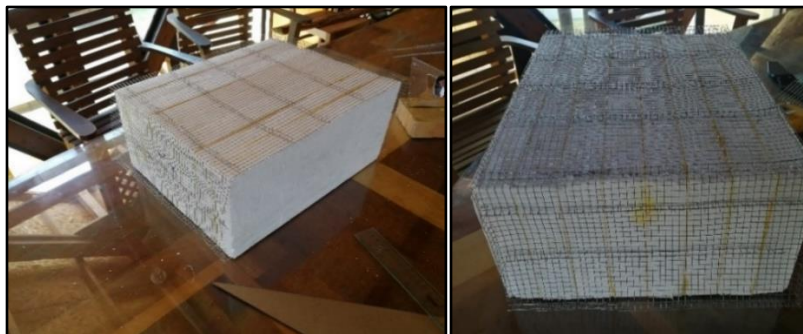
Figura 21. **Elaboración de prisma rectangular con poliestireno expandido**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Se colocaron prensas para garantizar el pegado uniforme las planchas de poliestireno expandido (EPS), una vez seco el prisma se colocó una malla de harnero de 1/8" de abertura en las caras que estarían en contacto con el flujo, esto con el fin de servir de refuerzo para la mezcla de mortero que sería aplicada para lograr la superficie final.

Figura 22. **Colocación de refuerzo de malla de harnero al prisma rectangular**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Se conformó una formaleta de madera contrachapada y poliestireno expandido, luego se realizó un mortero de cemento y arena previamente tamizada por el tamiz 40, con una proporción 1:1.

Figura 23. **Tamizado y elaboración de mezcla para fundición de prisma rectangular**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Figura 24. **Fundición de prisma rectangular**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Luego de la fundición del prisma rectangular se procedió a darle el tiempo prudencial de secado y curado, luego se lijó la superficie con lija 40 y 100 para eliminar imperfecciones que pudieran causar perturbaciones al circular el flujo de agua sobre el prisma rectangular.

Figura 25. **Lijado de la superficie del prisma rectangular**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Lijada la superficie en la base y caras laterales del prisma se pegó una capa de foami (etilvinilacetato), para evitar rallar o dañar el canal con el prisma y a la vez que quedara ajustado a las paredes del mismo.

Figura 26. **Pegado de foami a la base y caras laterales del prisma rectangular**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Por último, se aplicaron 4 capas de impermeabilizante para proteger la superficie y evitar la erosión del concreto para aumentar la vida útil del prisma rectangular y mantener la forma del mismo.

Figura 27. **Aplicación de impermeabilizante al prisma rectangular**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

### **3.1.2. Procedimiento experimental**

El ensayo fue realizado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, y cuenta con un canal hidrodinámico en el cual el caudal es abastecido con agua por medio de un sistema de bombeo que permite obtener distintos valores de flujo.

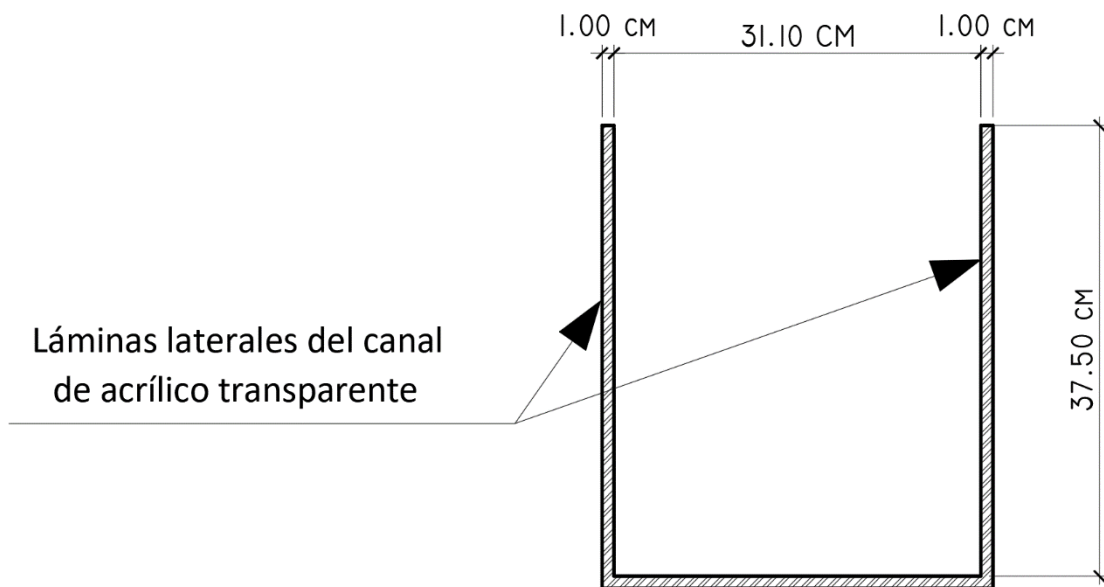
El canal hidrodinámico está elaborado con láminas de acrílico transparente de 10mm de espesor, reforzado en las uniones de cada lámina con estructura de acero. Las dimensiones de la sección transversal del canal se ilustran en la figura 29.

Figura 28. **Canal hidrodinámico del Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 29. **Sección transversal del canal hidrodinámico del Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2019.

- Procedimiento del ensayo
  - Fijar el prisma rectangular adecuadamente dentro del canal hidrodinámico y colocar plastilina en las orillas de las caras laterales para evitar filtraciones.
  - Definir las secciones donde se medirían los tirantes a lo largo del canal antes del prisma y sobre él.
  - Arrancar la bomba para suministrar flujo al canal y regular el flujo con la válvula de acuerdo a la altura de agua sobre el prisma y esperar a que se estabilice el flujo sobre el prisma.

Figura 30. **Instalación y montaje de prisma rectangular en el canal del laboratorio**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Tomar la lectura de los tirantes empleando el limnómetro cuya escala está en centímetros.



Figura 31. **Lectura de tirante de agua sobre el prisma rectangular empleando el limnómetro**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Medir el caudal con el método volumétrico de aforo tres veces.

Figura 32. **Aforo de caudal para el prisma rectangular**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Variar el flujo estrangulando la válvula y repetir el procedimiento anterior hasta obtener 3 tomas de datos.

### 3.1.3. Datos y cálculos

- Caudal

Determinar el caudal volumétrico para cada una de las tomas, empleando la siguiente ecuación

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{EC. 30}$$

Dónde:

- $Q$  = caudal (l/s)
- $V$  = volumen aforado (l)
- $t$  = tiempo de llenado (s)

Luego se calcula el promedio de las tres tomas de datos y este será el caudal a emplear en el resto de los cálculos. Dicho caudal se convierte a dimensionales  $\text{cm}^3/\text{s}$  para el resto de los cálculos.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} \quad \text{EC. 31}$$

Dónde:

- $Q_{prom}$  = caudal promedio
- $Q_n$  = caudal de cada toma de datos

Tabla III. **Caudales obtenidos empleando el prisma rectangular**

<b>TOMA DE DATOS 1</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
<b>1</b>	59,62	31,7	477,83	8,01459
<b>2</b>	60,62	32,5	483,82	7,98119
<b>3</b>	59,69	31,6	477,08	7,99263
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>7,99614</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>7 996,14</b>
<b>TOMA DE DATOS 2</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
<b>1</b>	76,84	31,4	475,58	6,18922
<b>2</b>	75,28	30,4	468,11	6,21825
<b>3</b>	77,66	32,3	482,32	6,21066
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>6,20605</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>6 206,05</b>
<b>TOMA DE DATOS 3</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
<b>1</b>	93,66	31,1	473,34	5,05381
<b>2</b>	93,69	30,9	471,84	5,03618
<b>3</b>	94,44	31,3	474,84	5,02795
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>5,03932</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>5 039,32</b>

Fuente: elaboración propia.

- Tirante

Se determinó por medio del limnómetro la altura del fondo del canal (y seco) antes del obstáculo y sobre él, luego con el caudal circulando se tomó medida del nivel del agua (y mojado), para luego haciendo una resta entre dichos valores se obtiene el tirante hidráulico. También se tomó medida del ancho del canal en cada sección.

$$y = y_{mojado} - y_{seco} \quad \text{EC. 32}$$

Dónde:

- $y$  = tirante (cm)

- $y_{mojado}$  = tirante con flujo circulando (cm)
- $y_{seco}$  = tirante medido al fondo del canal (cm)

Tabla IV. Tirante del flujo empleando el prisma rectangular

Sección	longitud acumulada (cm)	TOMA DE DATOS 1			TOMA DE DATOS 2			TOMA DE DATOS 3		
		y mojado (cm)	y seco (cm)	y (cm)	y mojado (cm)	y seco (cm)	y (cm)	y mojado (cm)	y seco (cm)	y (cm)
1	0,00	50,30	26,10	24,20	49,30	26,10	23,20	48,60	26,10	22,50
2	5,00	50,30	26,10	24,20	49,30	26,10	23,20	48,60	26,10	22,50
3	10,00	50,25	26,10	24,15	49,30	26,10	23,20	48,60	26,10	22,50
4	15,00	50,20	26,10	24,10	49,25	26,10	23,15	48,55	26,10	22,45
5	20,00	50,05	26,10	23,95	49,15	26,10	23,05	48,45	26,10	22,35
6	25,00	49,60	43,50	6,10	48,70	43,50	5,20	48,00	43,50	4,50
7	30,00	48,40	43,60	4,80	47,45	43,60	3,85	46,85	43,60	3,25
8	35,00	47,30	43,55	3,75	46,60	43,60	3,00	46,20	43,60	2,60
9	40,00	46,90	43,55	3,35	46,40	43,60	2,80	46,10	43,55	2,55
10	45,00	46,90	43,45	3,45	46,40	43,50	2,90	46,10	43,50	2,60
11	50,00	46,95	43,50	3,45	46,50	43,50	3,00	46,15	43,50	2,65
12	55,00	47,10	43,60	3,50	46,65	43,60	3,05	46,35	43,60	2,75
13	60,00	47,10	43,65	3,45	46,70	43,65	3,05	46,40	43,65	2,75
14	65,00	46,65	43,80	2,85	46,20	43,80	2,40	45,90	43,80	2,10

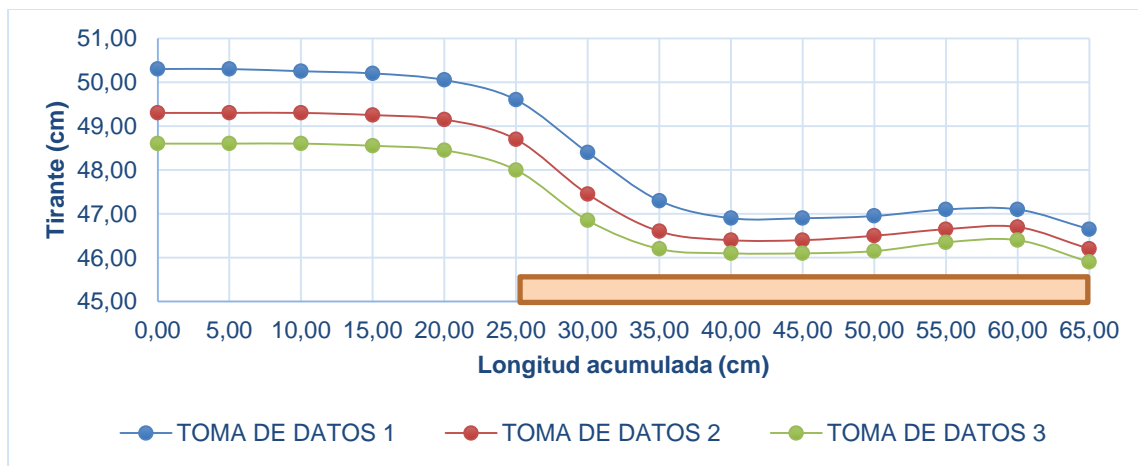
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Perfil del flujo sobre el prisma rectangular



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 34. Perfil del flujo sobre el prisma rectangular para las tres tomas de datos



Fuente: elaboración propia.

- Área hidráulica

Con los datos de ancho y tirante en cada sección se calcula el área hidráulica por medio de la siguiente ecuación:

$$A = b * y \quad \text{EC. 33}$$

Dónde:

- $A$  = área hidráulica (cm<sup>2</sup>)
- $b$  = ancho de cada sección (31.10 cm)
- $y$  = tirante de agua (cm)

- Velocidad del flujo

Por medio de la ecuación de continuidad se despeja para la velocidad como se definió en la ecuación 7:

$$V = \frac{Q_{promedio}}{A}$$

Dónde:

- $V$  = velocidad del flujo (cm/s)
- $Q$  = caudal promedio (cm<sup>3</sup>/s)
- $A$  = área hidráulica (cm<sup>2</sup>)

- Caudal unitario

Para un canal de sección rectangular de ancho  $b$ , se puede emplear el concepto de caudal unitario  $q$ , que se define como el caudal por unidad de ancho y se calcula con la ecuación 9:

$$q = \frac{Q_{promedio}}{b}$$

Dónde:

- $q$  = caudal unitario (cm<sup>2</sup>/s)
- $Q$  = caudal promedio (cm<sup>3</sup>/s)
- $b$  = ancho de la sección ( 31.10 cm)

- Número de Froude

Se calcula el número de Froude en cada sección del canal empleando la ecuación 11:

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{g\bar{y}}} \quad \begin{cases} \text{si } F_R = 1 & \rightarrow \text{flujo crítico} \\ \text{si } F_R < 1 & \rightarrow \text{flujo subcrítico} \\ \text{si } F_R > 1 & \rightarrow \text{flujo supercrítico} \end{cases}$$

Dónde:

- $F_R$  = número de Froude
- $v$  = velocidad del flujo (cm/s)
- $g$  = aceleración debido a la gravedad (981 cm/s<sup>2</sup>)
- $\bar{y}$  = tirante hidráulico (cm)

- Energía específica

La energía específica en un canal rectangular se determina en función del caudal unitario por medio de la ecuación 10:

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

Dónde:

- $E$  = energía específica (cm)
- $y$  = tirante (cm)
- $q$  = caudal unitario (cm<sup>2</sup>/s)
- $g$  = aceleración debido a la gravedad (981 cm/seg<sup>2</sup>)

- Fuerza específica

La fuerza específica para un canal rectangular se determina en función del caudal unitario por medio de la ecuación 23:

$$M = \frac{q^2}{gy} + \frac{y^2}{2}$$

Dónde:

- $M$  = fuerza específica (cm<sup>2</sup>)
- $q$  = caudal unitario (cm<sup>2</sup>/s)
- $g$  = aceleración debido a la gravedad (981 cm/seg<sup>2</sup>)
- $y$  = tirante (cm)



- Tirante crítico

Se define que la profundidad crítica para un canal rectangular en función del caudal unitario se determina por medio de la ecuación 13:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

Dónde:

- $y_c$  = tirante crítico (cm)
- $q$  = caudal unitario (cm<sup>2</sup>/s)
- $g$  = aceleración debido a la gravedad (981 cm/seg<sup>2</sup>)

Empleando las ecuaciones anteriores se realizan los cálculos correspondientes para cada una de las tomas de datos y se presentan los resultados en las siguientes tablas:

Tabla V. **Cálculos toma de datos 1 empleando el prisma rectangular**

<b>TOMA DE DATOS 1</b>									
<b>No.</b>	<b>y (cm)</b>	<b>Ancho (cm)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Velocidad (cm/s)</b>	<b>Caudal unitario (cm<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Froude</b>	<b>Tipo de flujo</b>	<b>Energía específica (cm)</b>	<b>Fuerza específica (cm<sup>2</sup>)</b>
1	24,20	31,10	752,62	10,62	257,11	0,07	subcrítico	24,26	295,60
2	24,20	31,10	752,62	10,62	257,11	0,07	subcrítico	24,26	295,60
3	24,15	31,10	751,07	10,65	257,11	0,07	subcrítico	24,21	294,40
4	24,10	31,10	749,51	10,67	257,11	0,07	subcrítico	24,16	293,20
5	23,95	31,10	744,85	10,74	257,11	0,07	subcrítico	24,01	289,61
6	6,10	31,10	189,71	42,15	257,11	0,54	subcrítico	7,01	29,65
7	4,80	31,10	149,28	53,56	257,11	0,78	subcrítico	6,26	25,56
8	3,75	31,10	116,63	68,56	257,11	1,13	supercrítico	6,15	25,00
9	3,35	31,10	104,19	76,75	257,11	1,34	supercrítico	6,35	25,73
10	3,45	31,10	107,30	74,52	257,11	1,28	supercrítico	6,28	25,48
11	3,45	31,10	107,30	74,52	257,11	1,28	supercrítico	6,28	25,48
12	3,50	31,10	108,85	73,46	257,11	1,25	supercrítico	6,25	25,38
13	3,45	31,10	107,30	74,52	257,11	1,28	supercrítico	6,28	25,48
14	2,85	31,10	88,64	90,21	257,11	1,71	supercrítico	7,00	27,71

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. Cálculos toma de datos 2 empleando el prisma rectangular

TOMA DE DATOS 2									
No.	y (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Velocidad (cm/s)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	Froude	Tipo de flujo	Energía específica (cm)	Fuerza específica (cm <sup>2</sup> )
1	23,20	31,10	721,52	8,60	199,55	0,06	subcrítico	23,24	270,87
2	23,20	31,10	721,52	8,60	199,55	0,06	subcrítico	23,24	270,87
3	23,20	31,10	721,52	8,60	199,55	0,06	subcrítico	23,24	270,87
4	23,15	31,10	719,97	8,62	199,55	0,06	subcrítico	23,19	269,71
5	23,05	31,10	716,86	8,66	199,55	0,06	subcrítico	23,09	267,41
6	5,20	31,10	161,72	38,38	199,55	0,54	subcrítico	5,95	21,33
7	3,85	31,10	119,74	51,83	199,55	0,84	subcrítico	5,22	17,95
8	3,00	31,10	93,30	66,52	199,55	1,23	supercrítico	5,26	18,03
9	2,80	31,10	87,08	71,27	199,55	1,36	supercrítico	5,39	18,42
10	2,90	31,10	90,19	68,81	199,55	1,29	supercrítico	5,31	18,20
11	3,00	31,10	93,30	66,52	199,55	1,23	supercrítico	5,26	18,03
12	3,05	31,10	94,85	65,43	199,55	1,20	supercrítico	5,23	17,96
13	3,05	31,10	94,86	65,43	199,55	1,20	supercrítico	5,23	17,96
14	2,40	31,10	74,64	83,15	199,55	1,71	supercrítico	5,92	19,79

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Cálculos toma de datos 3 empleando el prisma rectangular

TOMA DE DATOS 3									
No.	y (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Velocidad (cm/s)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	Froude	Tipo de flujo	Energía específica (cm)	Fuerza específica (cm <sup>2</sup> )
1	22,50	31,10	699,75	7,20	162,04	0,05	subcrítico	22,53	254,31
2	22,50	31,10	699,75	7,20	162,04	0,05	subcrítico	22,53	254,31
3	22,50	31,10	699,75	7,20	162,04	0,05	subcrítico	22,53	254,31
4	22,45	31,10	698,20	7,22	162,04	0,05	subcrítico	22,48	253,19
5	22,35	31,10	695,09	7,25	162,04	0,05	subcrítico	22,38	250,96
6	4,50	31,10	139,95	36,01	162,04	0,54	subcrítico	5,16	16,07
7	3,25	31,10	101,08	49,86	162,04	0,88	subcrítico	4,52	13,52
8	2,60	31,10	80,86	62,32	162,04	1,23	supercrítico	4,58	13,67
9	2,55	31,10	79,31	63,54	162,04	1,27	supercrítico	4,61	13,75
10	2,60	31,10	80,86	62,32	162,04	1,23	supercrítico	4,58	13,67
11	2,65	31,10	82,42	61,15	162,04	1,20	supercrítico	4,56	13,61
12	2,75	31,10	85,53	58,92	162,04	1,13	supercrítico	4,52	13,51
13	2,75	31,10	85,53	58,92	162,04	1,13	supercrítico	4,52	13,51
14	2,10	31,10	65,431	77,16	162,04	1,70	supercrítico	5,13	14,95

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Tirantes críticos teóricos empleando el prisma rectangular**

<b>Tirante crítico <math>y_c</math> (cm)</b>	
<b>TOMA DE DATOS 1</b>	4,16
<b>TOMA DE DATOS 2</b>	3,51
<b>TOMA DE DATOS 3</b>	3,06

Fuente: elaboración propia.

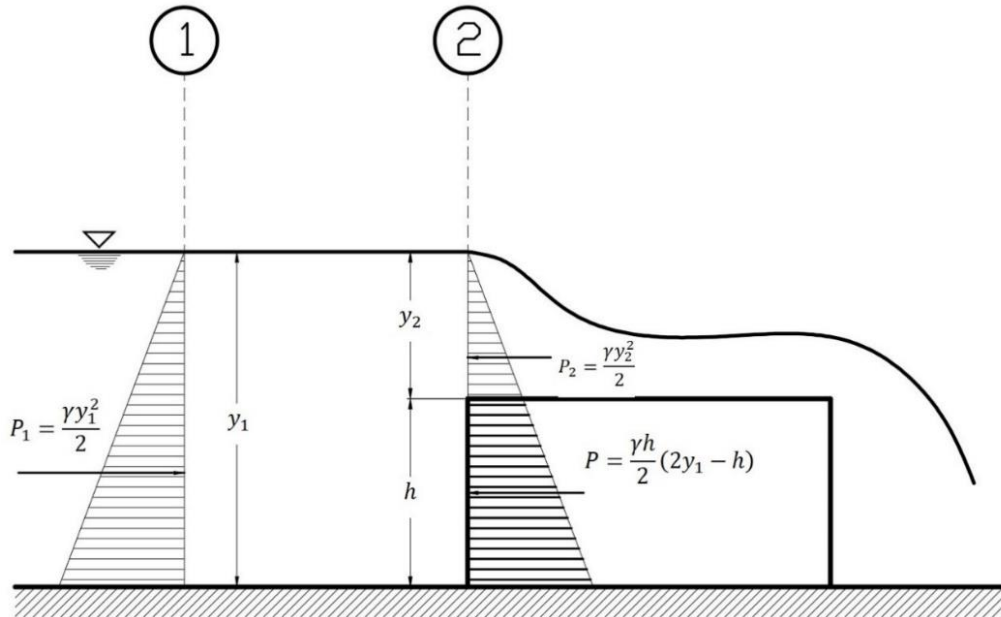
Se debe resaltar que el tirante crítico se encuentra en todas las tomas de datos entre la sección 7 y 8, tal como se observa que entre dichos dos valores del número de Froude se encuentra el cambio entre flujo subcrítico y supercrítico.

- Fuerza sobre la cara del prisma

Para el análisis de la fuerza sobre la cara del prisma se puede determinar de tres maneras: por el análisis de la segunda ley de Newton, por análisis de la fuerza hidrostática y por análisis de la ecuación de cantidad de movimiento.

Se define el volumen de control en la sección aguas arriba del prisma (sección 1 en la toma de datos), y en la sección al inicio del prisma (sección 6 en la toma de datos).

Figura 35. **Análisis de fuerzas sobre la cara del prisma rectangular**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2019.

- Fuerza sobre la cara del prisma mediante la segunda ley de Newton.

El análisis teórico utilizando la segunda Ley de Newton permite obtener la fuerza por unidad de ancho sobre la pared aguas arriba del prisma y se determina por medio de la ecuación 25:

$$P = \frac{\gamma h}{2} (2y_1 - h)$$

Dónde:

- $P$  = fuerza por unidad de ancho sobre la pared del prisma (N/m).

- $\gamma$  = peso específico del agua (9810 N/m<sup>3</sup>).
  - $y_1$  = tirante en la sección aguas arriba del prisma (cm).
  - $h$  = altura del prisma (cm).
- Fuerza sobre la cara del prisma mediante la presión hidrostática

Por el análisis de presión hidrostática sobre la cara del prisma como se observa en la figura 34 es posible calcular la fuerza sobre la cara del prisma como una resta de fuerzas sobre la cara del mismo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P = P_1 - P_2 \quad \text{EC. 34}$$

$$P = \frac{\gamma y_1^2}{2} - \frac{\gamma y_2^2}{2} \quad \text{EC. 35}$$

Dónde:

- $P$  = fuerza por unidad de ancho sobre la pared del prisma (N/m).
- $P_1$  = fuerza hidrostática en la sección aguas arriba del prisma (m<sup>2</sup>).
- $P_2$  = fuerza hidrostática en la sección en el inicio del prisma (m<sup>2</sup>).
- $\gamma$  = peso específico del agua (9810 N/m<sup>3</sup>).
- $y_1$  = tirante en la sección aguas arriba del prisma (cm).
- $y_2$  = tirante en la sección en el inicio del prisma (cm).

- Fuerza sobre la cara del prisma mediante la ecuación de cantidad de movimiento

El análisis teórico utilizando la ecuación de cantidad de movimiento permite determinar la fuerza sobre la cara del prisma mediante la fuerza específica por medio de la ecuación 22 despejada para la fuerza  $P$ , tomando en cuenta evaluar secciones en extremos opuestos al volumen de control:

$$P = (M_1 - M_2) \gamma$$

Dónde:

- $P$  = fuerza por unidad de ancho sobre la pared del prisma (N/m).
- $M_1$  = fuerza específica en la sección aguas arriba del volumen de control ( $m^2$ ).
- $M_2$  = fuerza específica en la sección aguas abajo del volumen de control ( $m^2$ ).
- $\gamma$  = peso específico del agua (9 810 N/m<sup>3</sup>).

Nota: para el cálculo se emplea como sección aguas arriba la sección 1 y como sección aguas abajo la sección 8 de la toma de datos.

Tabla IX. **Datos para cálculo de la fuerza por unidad de ancho sobre la cara del prisma rectangular**

Datos	Peso específico (N/m <sup>3</sup> )	y <sub>1</sub> (sección 1)		y <sub>2</sub> (sección 6)		h (m)	M <sub>1</sub> (sección 1)		M <sub>2</sub> (sección 8)	
		cm	m	cm	m		cm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
TOMA DE DATOS 1	9 810	24,2	0,242	6,1	0,061	0,175	295,60	0,029560	25,00	0,002500
TOMA DE DATOS 2		23,2	0,232	5,2	0,052		270,87	0,027087	18,03	0,001803
TOMA DE DATOS 3		22,5	0,225	4,5	0,045		254,31	0,025431	13,67	0,001367

Fuente: elaboración propia.

Empleando las ecuaciones anteriores para el cálculo de la fuerza sobre la cara del prisma se realizan los cálculos correspondientes para cada una de las tomas de datos y se presentan los resultados en la siguiente tabla:

Tabla X. **Resultados de fuerza por unidad de ancho sobre la cara del prisma rectangular**

Resultados	Segunda ley de Newton (N/m)	Presión Hidrostática (N/m)		Ecuación de cantidad de movimiento (N/m)
TOMA DE DATOS 1	265,24	P <sub>1</sub>	287,26	265,46
		P <sub>2</sub>	18,25	
		P	269,00	
TOMA DE DATOS 2	248,07	P <sub>1</sub>	264,01	248,04
		P <sub>2</sub>	13,26	
		P	250,74	
TOMA DE DATOS 3	236,05	P <sub>1</sub>	248,32	236,07
		P <sub>2</sub>	9,93	
		P	238,38	

Fuente: elaboración propia.



- Caudal unitario teórico

El análisis teórico utilizando la segunda Ley de Newton permite obtener una expresión para el caudal en función de la altura de la lámina de agua por encima del prisma, tal como se indicó en el capítulo 2 por medio de la ecuación 26:

$$q = 0.433\sqrt{2g} \left( \frac{y_1}{y_1 + h} \right)^{1/2} H^{2/3}$$

Donde:

- $q$  = caudal unitario teórico (cm<sup>2</sup>/s)
- $g$  = aceleración debido a la gravedad (981 cm/seg<sup>2</sup>)
- $y_1$  = tirante en la sección aguas arriba del prisma (cm)
- $h$  = altura del prisma (cm)
- $H$  = tirante en la sección en el inicio del prisma (cm)

Tabla XI. **Datos para cálculo de caudal teórico con la ecuación 13**

Datos	$y_1$ (sección 1) cm	H (sección 6) cm	h (cm)	Aceleración debido a la gravedad (cm/s <sup>2</sup> )
TOMA DE DATOS 1	24,2	6,1	17,5	981
TOMA DE DATOS 2	23,2	5,2		
TOMA DE DATOS 3	22,5	4,5		

Fuente: elaboración propia.

Empleando la ecuación anterior para la determinación del caudal unitario teórico, se realizan los cálculos correspondientes para cada una de las tomas de datos y se presentan los resultados en la siguiente tabla, incluyendo también

el valor de caudal unitario experimental y el error relativo porcentual entre ambos.

Tabla XII. **Comparación caudal unitario teórico y experimental con la ecuación 13**

No. de toma de datos	Caudal unitario teórico (cm <sup>2</sup> /s)	Caudal unitario experimental (cm <sup>2</sup> /s)	Error relativo porcentual
TOMA DE DATOS 1	220,13	257,11	14,38
TOMA DE DATOS 1	171,71	199,55	13,95
TOMA DE DATOS 1	137,31	162,04	15,26

Fuente: elaboración propia.

Como se observa los datos poseen un valor alto de error relativo porcentual, dado que para llegar a la expresión de la ecuación 13 se parte de la expresión de momentum aplicado al prisma y se sustituye  $y_1 - h = 2y_2$ , esta suposición no es aplicable a las tomas de datos porque en ninguna de las corridas se cumple dicha suposición, dado que el análisis no se realiza para un vertedero con “descarga libre”<sup>32</sup> como sucede en las tomas realizadas.

Por lo cual se recalcula el caudal unitario de cada toma partiendo de nuevo del principio de momentum aplicado al prisma:

$$\frac{\gamma y_1^2}{2} - \frac{\gamma y_2^2}{2} - \frac{\gamma h}{2} (2y_1 - h) = \frac{\gamma q}{g} \left( \frac{q}{y_2} - \frac{q}{y_1} \right)$$

Simplificando el peso específico de todos los términos y reagrupando:

<sup>32</sup> RODRÍGUEZ DIAZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica experimental*. p. 201.

$$\frac{y_1^2}{2} - \frac{y_2^2}{2} - \frac{h}{2}(2y_1 - h) = \frac{q^2}{g} \left( \frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right)$$

Despejando para  $q$ :

$$q = \pm \sqrt{\frac{g \left( \frac{y_1^2}{2} - \frac{y_2^2}{2} - \frac{h}{2}(2y_1 - h) \right)}{\left( \frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right)}}$$

Para fines prácticos se toma solo la raíz positiva de la ecuación; empleando un CAS para factorizar los términos se obtiene:

$$q = 0.5 \sqrt{\frac{2g y_1 y_2 (y_1^2 - 2h y_1 - y_2^2 + h^2)}{y_1 - y_2}} \quad \text{EC. 36}$$

Como se expuso en el capítulo 2 para el análisis se hacen algunas suposiciones, si se toma la segunda suposición que dice:

- La profundidad  $y_2$  es la profundidad mínima sobre el vertedero

Entonces para la ecuación 36:

- $q$  = caudal unitario teórico ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
- $g$  = aceleración debido a la gravedad ( $981 \text{ cm}/\text{seg}^2$ )
- $y_1$  = tirante en la sección aguas arriba del prisma (cm)
- $y_2$  = tirante mínimo sobre el prisma (cm)
- $h$  = altura del prisma (cm)

En las tomas de datos el tirante mínimo sobre el prisma sucede en la sección 9.

Tabla XIII. **Datos para cálculo de caudal teórico con la ecuación 36**

Datos	$y_1$ (sección 1) cm	$y_2$ (sección 9) cm	h (cm)	Aceleración debido a la gravedad (cm/s <sup>2</sup> )
TOMA DE DATOS 1	24,2	3,35	17,5	981
TOMA DE DATOS 2	23,2	2,80		
TOMA DE DATOS 3	22,5	2,55		

Fuente: elaboración propia.

Empleando la ecuación 36 para el del caudal unitario teórico, se realizan los cálculos correspondientes para cada una de las tomas de datos y se presentan los resultados en la siguiente tabla incluyendo también el valor de caudal unitario experimental y el error relativo porcentual entre ambos.

Tabla XIV. **Comparación caudal unitario teórico y experimental con la ecuación 36**

No. de toma de datos	Caudal unitario teórico (cm <sup>2</sup> /s)	Caudal unitario experimental (cm <sup>2</sup> /s)	Error relativo porcentual
TOMA DE DATOS 1	253,40	257,11	1,44
TOMA DE DATOS 1	196,22	199,55	1,67
TOMA DE DATOS 1	161,53	162,04	0,31

Fuente: elaboración propia.

Si en la ecuación 36 ingresamos el tirante crítico calculado para cada toma de datos en el valor de  $y_2$  obtenemos los siguientes resultados:

Tabla XV. **Comparación caudal unitario teórico y experimental con la ecuación 36 usando el tirante crítico**

No. de toma de datos	Caudal unitario teórico (cm <sup>2</sup> /s)	Caudal unitario experimental (cm <sup>2</sup> /s)	Error relativo porcentual
TOMA DE DATOS 1	260,73	257,11	1,41
TOMA DE DATOS 1	202,29	199,55	1,37
TOMA DE DATOS 1	164,81	162,04	1,71

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.4. Gráficas

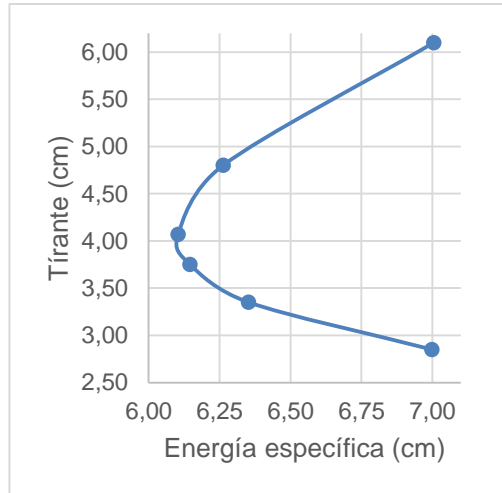
Con los datos calculados se presentan gráficos de energía específica para cada una de las tomas de datos, tomando valores para una mejor apreciación de la gráfica entre la sección 6 y 9, e incluyendo el valor del tirante crítico y energía específica mínima, además se incluye también el dato de la sección 14 por ser la última sección y donde termina el prisma. No se consideran los valores de las secciones 1 a la 5 ni de la sección 10 a la 13 por ser valores aproximadamente constantes que no permitirían la apreciación adecuada de la gráfica.

Tabla XVI. **Datos para gráficas de energía específica en el ensayo empleando el prisma rectangular**

Sección No.	TOMA DE DATOS 1		TOMA DE DATOS 2		TOMA DE DATOS 3	
	y (cm)	Energía específica (cm)	y (cm)	Energía específica (cm)	y (cm)	Energía específica (cm)
6	6,10	7,01	5,20	5,95	4,50	5,16
7	4,80	6,26	3,85	5,22	3,25	4,52
crítica	4,07	6,10	3,44	5,16	2,99	4,49
8	3,75	6,15	3,00	5,26	2,60	4,58
9	3,35	6,35	2,80	5,39	2,55	4,61
14	2,85	7,00	2,40	5,92	2,10	5,13

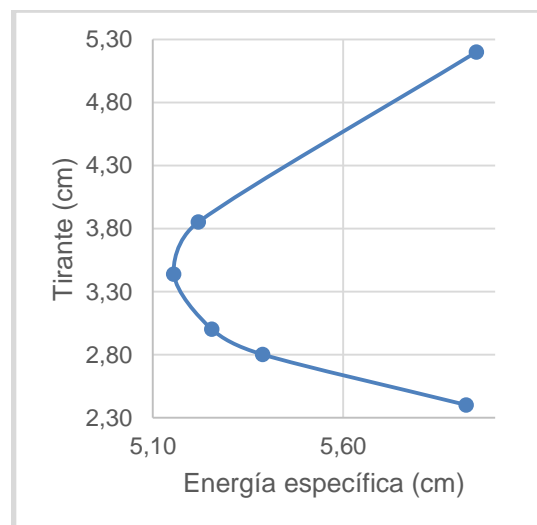
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Gráfica de energía específica toma de datos 1 empleando el prisma rectangular**



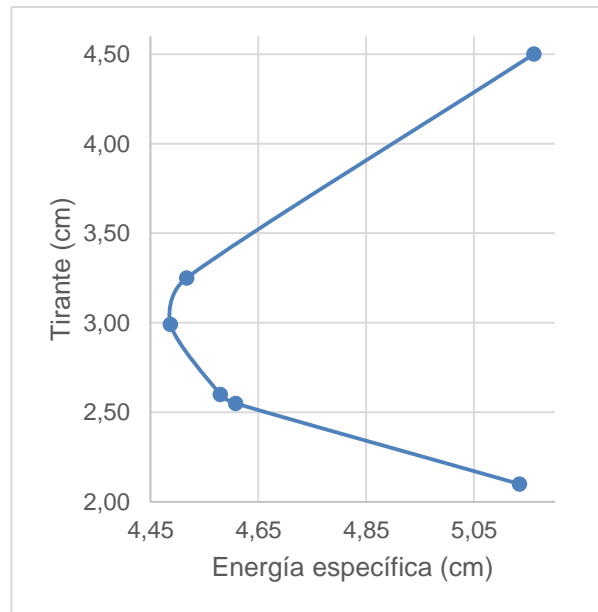
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Gráfica de energía específica toma de datos 2 empleando el prisma rectangular**



Fuente: elaboración propia.

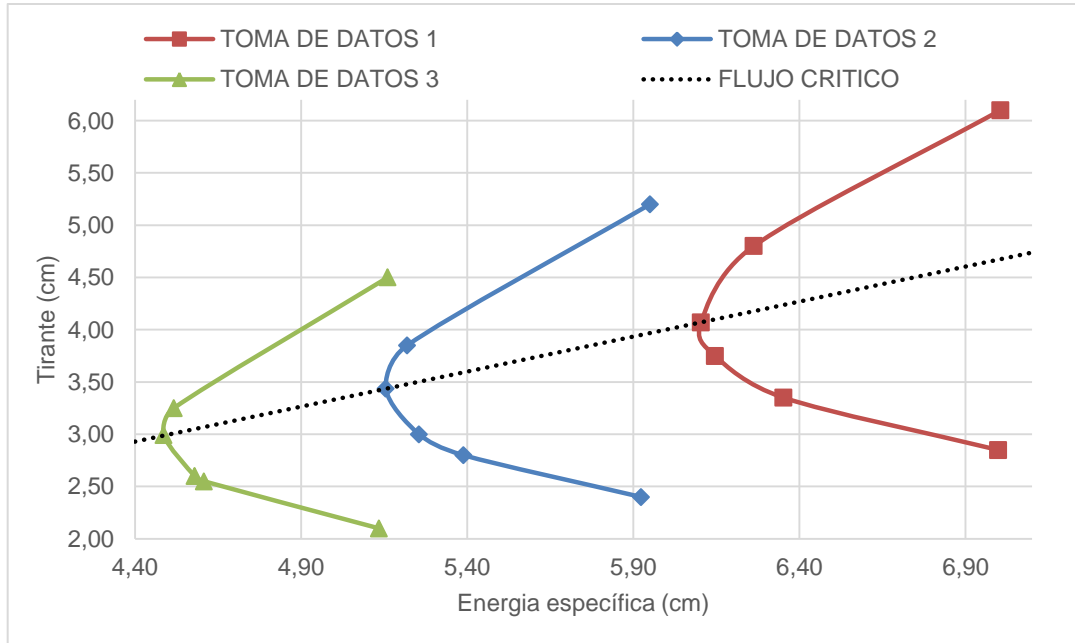
Figura 38. **Gráfica de energía específica toma de datos 3 empleando el prisma rectangular**



Fuente: elaboración propia.

Como comparativa se presentan las curvas de energía específica de las tres tomas de datos en una sola figura, además, se incluye una línea punteada que indica el estado crítico del flujo para cada uno de los caudales analizados.

Figura 39. **Gráfica de comparación de energía específica de las tres tomas de datos empleando el prisma rectangular**



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan gráficos de la fuerza específica los cuales fueron generados con los cálculos de cada una de las tomas de datos, tomando valores para una mejor apreciación de la gráfica entre la sección 6 y 9, e incluyendo el valor del tirante crítico y fuerza específica mínima, además se incluye también el dato de la sección 14 por ser la última sección donde termina el prisma. No se consideran los valores de las secciones 1 a la 5 ni de la sección 10 a la 13 por ser valores aproximadamente constantes que no permitirían la apreciación adecuada de la gráfica.

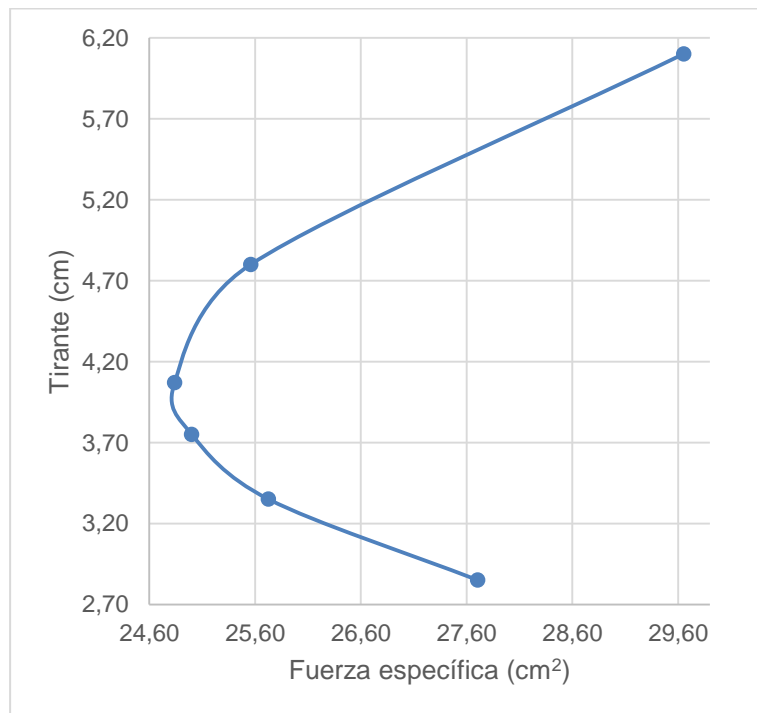


Tabla XVII. **Datos para gráficas de fuerza específica empleando el prisma rectangular**

Sección No.	TOMA DE DATOS 1		TOMA DE DATOS 2		TOMA DE DATOS 3	
	Y (cm)	Fuerza específica (cm <sup>2</sup> )	Y (cm)	Fuerza específica (cm <sup>2</sup> )	Y (cm)	Fuerza específica (cm <sup>2</sup> )
6	6,10	29,65	5,20	21,33	4,50	16,07
7	4,80	25,56	3,85	17,95	3,25	13,52
<b>crítica</b>	4,07	24,84	3,44	17,72	2,99	13,42
8	3,75	25,00	3,00	18,03	2,60	13,67
9	3,35	25,73	2,80	18,42	2,55	13,75
14	2,85	27,71	2,40	19,79	2,10	14,95

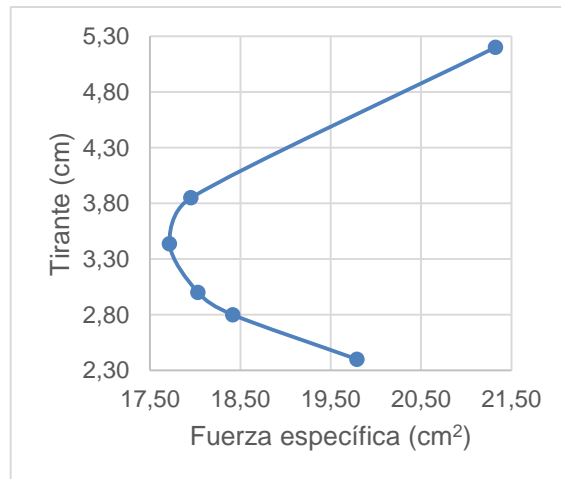
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Gráfica fuerza específica toma de datos 1 empleando el prisma rectangular**



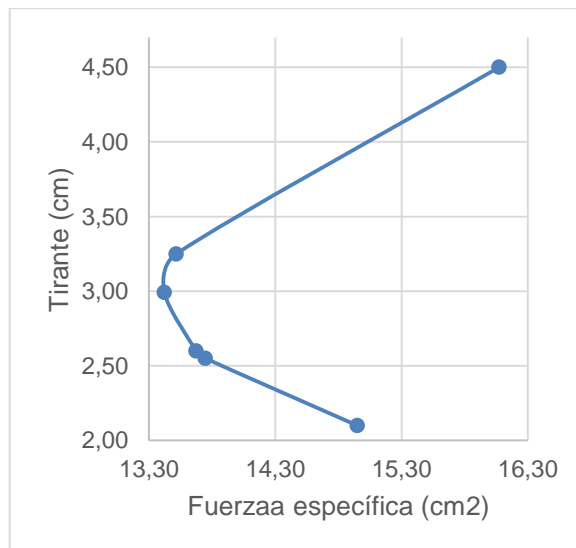
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Gráfica fuerza específica toma de datos 2 empleando el prisma rectangular**



Fuente: elaboración propia.

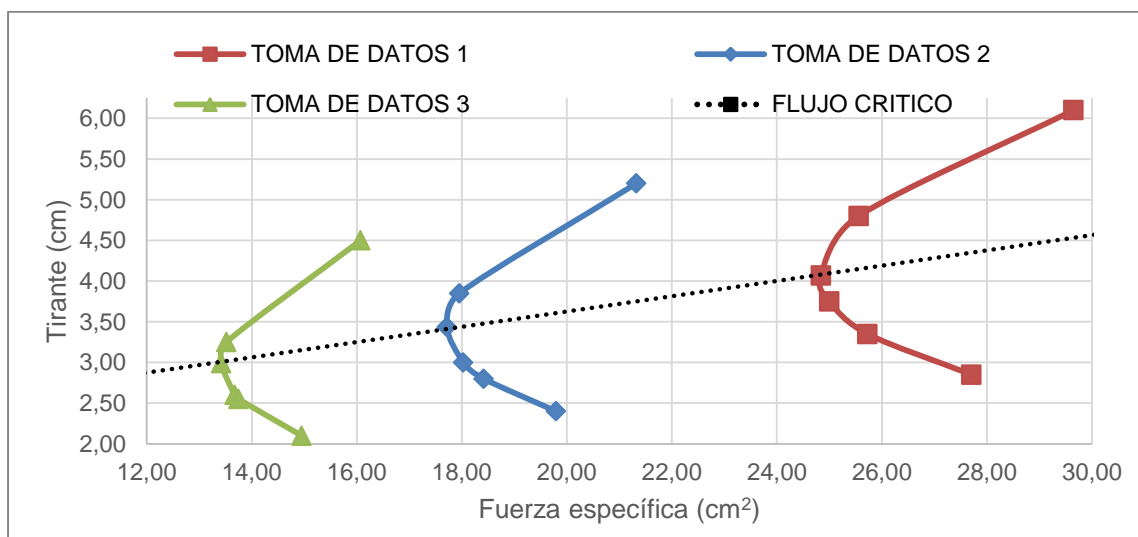
Figura 42. **Gráfica fuerza específica toma de datos 3 empleando el prisma rectangular**



Fuente: elaboración propia.

Como comparativa se presentan las curvas de fuerza específica de las tres tomas de datos en una sola figura, además, se incluye una línea punteada que indica el estado crítico del flujo para cada uno de los caudales analizados.

Figura 43. **Gráfica de comparación de fuerza específica de las tres tomas de datos empleando el prisma rectangular**



Fuente: elaboración propia.

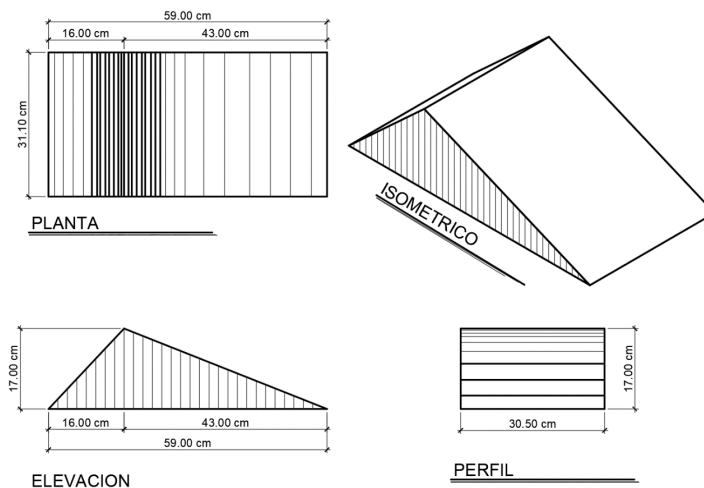
### 3.2. Ensayo de energía específica

Se muestra el procedimiento de diseño y construcción de los modelos para el estudio de la fuerza específica, así como el procedimiento experimental, datos, cálculos y graficas obtenidas.

#### 3.2.1. Diseño y construcción de la estructura que modifica el fondo del canal para estudio de la energía específica

Para el ensayo de la energía específica en el cual se “modifica el fondo del canal se emplea un prisma triangular”<sup>33</sup>, el modelo fue fabricado con planchas pegadas de poliestireno expandido (EPS), de 1 ½” de espesor en su centro, esto con el fin de disminuir el peso final del prisma.

Figura 44. Dimensiones del prisma triangular que modifica el fondo del canal



Fuente: Elaboración propia, empleando AutoCAD 2019.

<sup>33</sup> RODRÍGUEZ DIAZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica experimental*. p. 188.

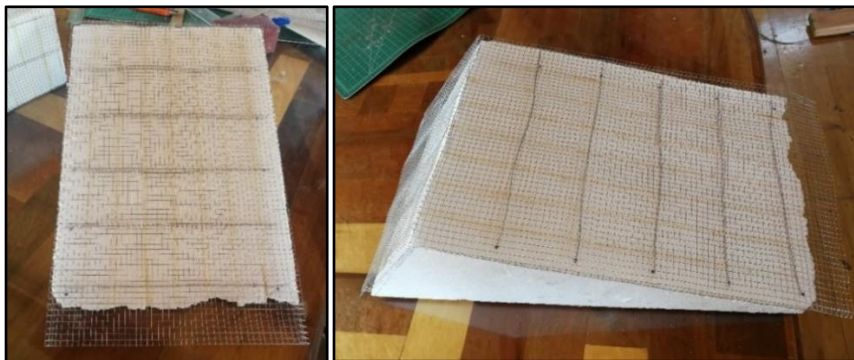
Figura 45. **Elaboración de prisma triangular con poliestireno expandido**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Se colocaron prensas para garantizar el pegado uniforme de las planchas de poliestireno expandido (EPS), una vez seco el prisma se colocó una malla de harnero de 1/8" de abertura en la superficie que estarían en contacto con el flujo, esto con el fin de servir de refuerzo para la mezcla de mortero que sería aplicada para lograr la superficie final.

Figura 46. **Colocación de refuerzo de malla de harnero al prisma triangular**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Se conformó una formaleta de madera contrachapada y poliestireno expandido, luego se realizó un mortero de cemento y arena previamente tamizada por el tamiz 40, con una proporción 1:1.

Figura 47. **Tamizado y elaboración de mezcla para fundición de prisma triangular**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Figura 48. **Fundición de prisma triangular**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Luego de la fundición del prisma triangular se procedió a darle el tiempo prudencial de secado y curado, luego se lijó la superficie con lija 40 y 100 para eliminar imperfecciones que pudieran causar perturbaciones al circular el flujo de agua sobre el prisma triangular.

Figura 49. **Lijado de la superficie del prisma triangular**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Lijada la superficie en la base y caras laterales del prisma triangular se pegó una capa de foami (etilvinilacetato), para evitar rallar o dañar el canal con el prisma y a la vez que quedara ajustado a las paredes del mismo.

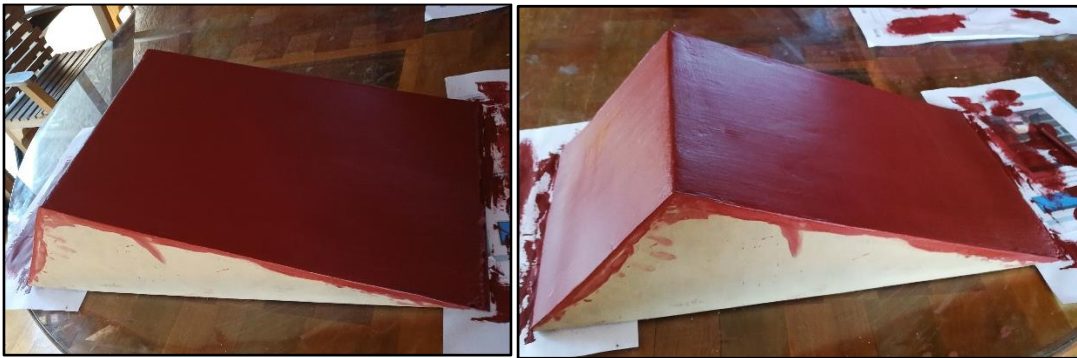
Figura 50. **Pegado de foami a la base y caras laterales del prisma triangular**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Por último, se aplicaron 4 capas de impermeabilizante para proteger la superficie y evitar la erosión del concreto para aumentar la vida útil del prisma triangular y mantener la forma del mismo.

Figura 51. **Aplicación de impermeabilizante al prisma**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

### **3.2.2. Procedimiento experimental de la estructura que modifica el fondo del canal**

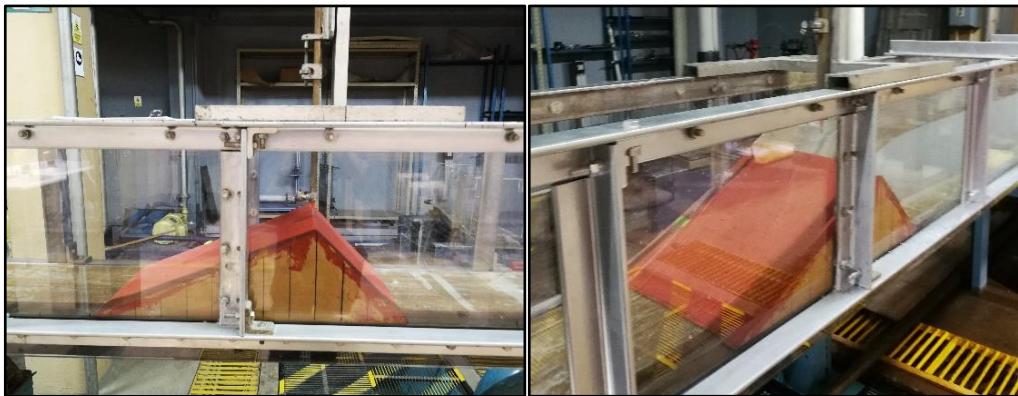
El ensayo fue realizado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, y cuenta con un canal hidrodinámico en el cual el caudal es abastecido con agua por medio de un sistema de bombeo que permite obtener distintos valores de flujo.

El canal hidrodinámico está elaborado con láminas de acrílico transparente de 10mm de espesor, reforzado en las uniones de cada lámina con estructura de acero. Las dimensiones de la sección transversal del canal se ilustran en la figura 29.



- Procedimiento del ensayo
  - Fijar el prisma triangular que modifica el fondo del canal adecuadamente.
  - Definir las secciones donde se medirían los tirantes a lo largo del canal antes, sobre y después del prisma. Una de las lecturas debe coincidir con el punto más alto de la estructura.
  - Arrancar la bomba para suministrar flujo al canal y regular el flujo con la válvula de acuerdo a la altura de agua sobre el prisma y esperar a que se estabilice el flujo sobre él.

Figura 52. **Instalación y montaje de prisma triangular en el canal del laboratorio**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Tomar la lectura de los tirantes empleando el limnómetro cuya escala está en centímetros.

Figura 53. **Lectura de tirante de agua sobre el prisma triangular empleando el limnómetro**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Medir el caudal con el método volumétrico de aforo tres veces.

Figura 54. **Aforo de caudal para el prisma triangular**



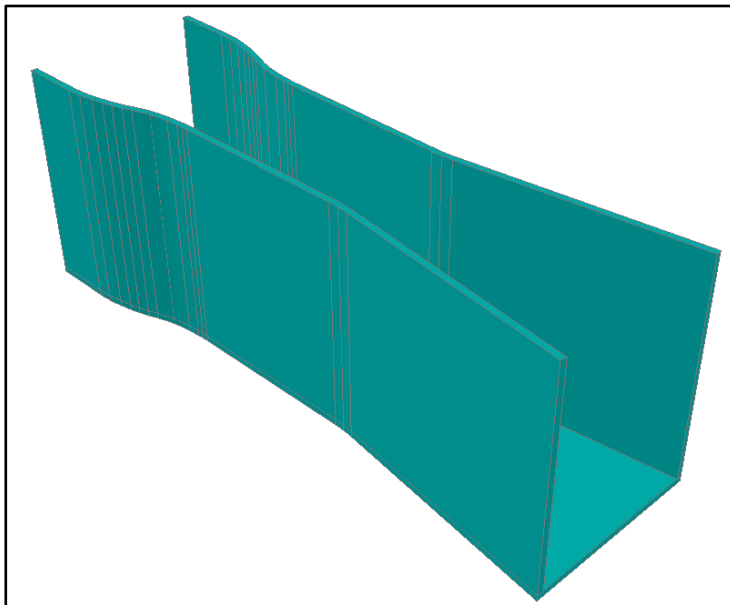
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Variar el flujo estrangulando la válvula y repetir el procedimiento anterior hasta obtener 5 tomas de datos.

### 3.2.3. Diseño y construcción de la estructura que modifica el ancho del canal para estudio de la energía específica

Para el ensayo de la energía específica se emplea como estructura que modifica el ancho un canal con “reducción gradual”<sup>34</sup>, el modelo fue fabricado con planchas de acrílico transparente de 5mm de espesor. Se seleccionó dicho material por ser liviano pero muy resistente, lo cual lo hace manipulable en el montaje del mismo, además, al ser transparente permite la visualización del flujo durante la realización de los ensayos.

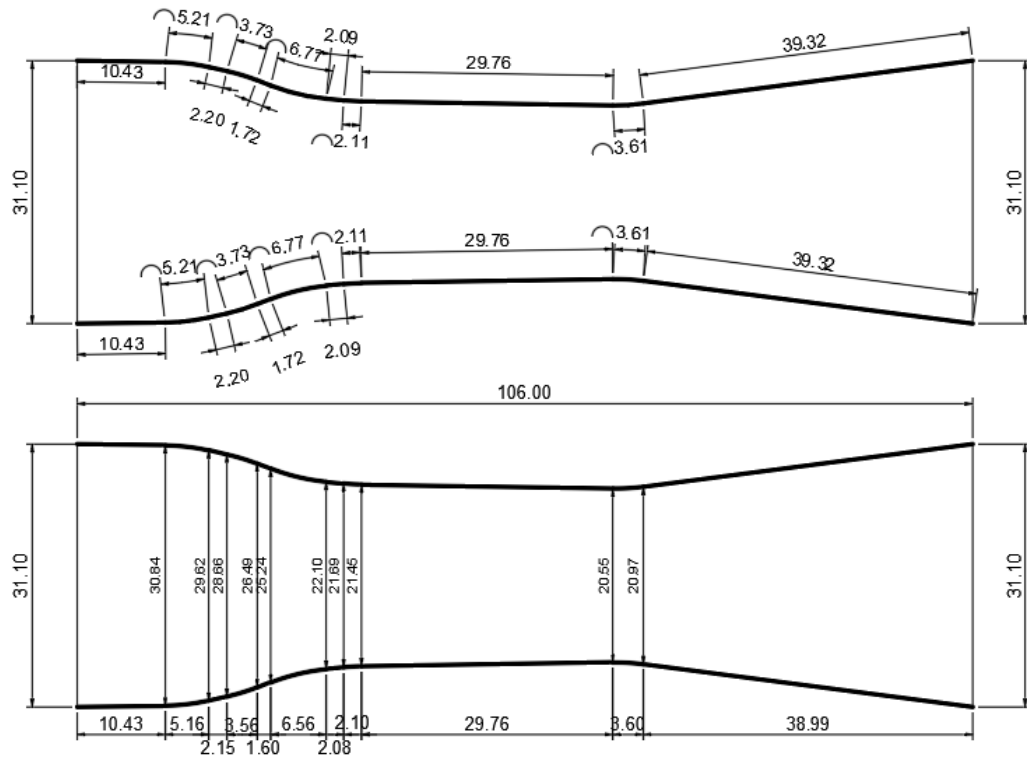
Figura 55. **Modelo 3d de la reducción que modifica el ancho del canal**



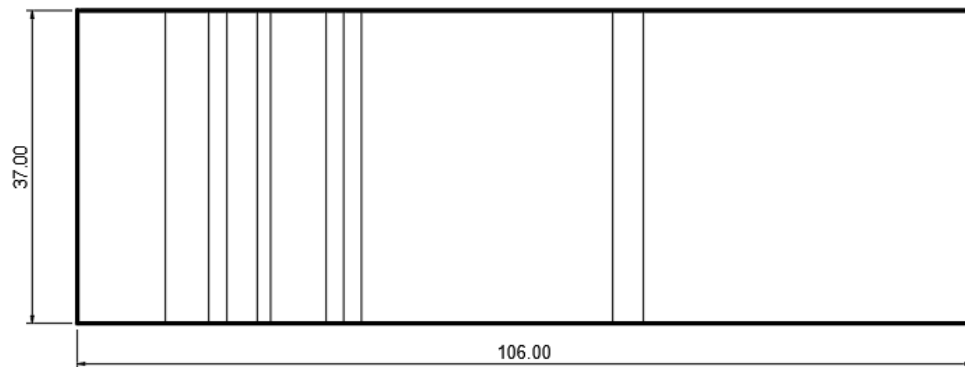
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2019.

<sup>34</sup> RODRÍGUEZ DIAZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica experimental*. p. 188.

Figura 56. Dimensiones de la reducción que modifica el ancho del canal



PLANTA



ELEVACION

NOTA:  
 • COTAS EN CMS  
 • RADIO DE TODOS LOS ARCOS = 25 CMS

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2019.

Se realizó el trazo de la forma de las paredes de la reducción de acuerdo al diseño en madera, conformadas las dos caras de la plantilla se moldeó la base del mismo con plywood de 5mm de espesor y para obtener la forma fue humedecido y prensado con sargentos.

Figura 57. **Elaboración de molde de la reducción**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Luego de lograda la forma del plywood se clavó a las bases de los moldes conformando las dos partes del mismo.

Figura 58. **Molde de la reducción**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Luego se procedió al corte de las piezas de acrílico en la sierra caladora.

Figura 59. **Corte de piezas de la reducción**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Se procedió al moldeado de las paredes del canal por calentamiento del material utilizando pistola de calor para lograr que cediera a la forma del molde, luego se colocó preno en el molde y para garantizar la forma se le colocaron sargentos.

Figura 60. **Moldeado de paredes de la reducción**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Una vez moldeadas las paredes laterales se procedió a pegar las tres piezas empleando Cloruro de Metileno líquido.

Figura 61. **Pegado de piezas de la reducción**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

Luego se perforaron las paredes del canal empleando taladro y se colocaron barras roscadas de 3/8" asegurándolas con roldanas y tuercas todo de acero galvanizado para garantizar la rigidez del canal, además, en los extremos se colocaron refuerzos moldeados del mismo acrílico.

Figura 62. **Estructura final de la reducción**



Fuente: Taller de tecnología de la madera, CII, USAC.

### **3.2.4. Procedimiento experimental de la estructura que modifica el ancho del canal**

El ensayo fue realizado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, este cuenta con un canal hidrodinámico en el cual, el caudal es abastecido con agua por medio de un sistema de bombeo que permite obtener distintos valores de flujo.

El canal hidrodinámico está elaborado con láminas de acrílico transparente de 10mm de espesor, reforzado en las uniones de cada lámina con estructura de acero. Las dimensiones de la sección transversal del canal se ilustran en la figura 29.

- Procedimiento del ensayo
  - Fijar la estructura que modifica el ancho del canal adecuadamente, colocar plastilina en las orillas de las caras laterales y cinta en la base para evitar filtraciones.
  - Definir las secciones donde se medirían los tirantes a lo largo de la estructura, como mínimo 10 secciones.
  - Arrancar la bomba para suministrar flujo al canal y regular el flujo con la válvula de acuerdo a la altura del tirante a la entrada de la estructura y esperar a que se establezca el flujo.



Figura 63. **Instalación y montaje de la reducción en el canal del laboratorio**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Tomar la lectura de los tirantes empleando el limnímetro cuya escala está en centímetros. También tomar lectura del ancho en cada sección.

Figura 64. **Lectura de tirante de agua en la reducción empleando el limnímetro**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Medir el caudal con el método volumétrico de aforo tres veces.

Figura 65. **Aforo de caudal de la reducción**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Variar el flujo estrangulando la válvula y repetir el procedimiento anterior hasta obtener 5 tomas de datos.

### 3.2.5. Datos y cálculos para ambas estructuras

Se calculan las siguientes variables:

- Caudal para cada toma de datos empleando la ecuación 30
- Caudal promedio cada toma de datos empleando la ecuación 31
- Tirante para las secciones de las tomas de datos empleando la ecuación 32.

- Área hidráulica para las secciones de las tomas de datos empleando la ecuación 33.
- Velocidad del flujo para las secciones de las tomas de datos empleando la ecuación 7.
- Caudal unitario para cada toma de datos en el caso del ensayo en el que se emplea el prisma que modifica el fondo del canal y caudal unitario en las secciones de las tomas de datos en las que se emplea la reducción que modifica el ancho del canal, en ambos casos empleando la ecuación 9.
- Numero de Froude para las secciones de las tomas de datos empleando la ecuación 11.
- Energía específica para las secciones de las tomas de datos empleando la ecuación 10.
- Tirante crítico para cada toma de datos empleando la ecuación 13.

#### **3.2.5.1. Resultados del ensayo de energía específica empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal**

Empleando las ecuaciones anteriores se realizan los cálculos correspondientes para cada una de las tomas de datos del prisma que modifica el fondo del canal y se presentan los resultados en las siguientes tablas:

Tabla XVIII. **Caudales obtenidos empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal**

<b>TOMA DE DATOS 1</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
1	27,72	23,50	416,84	15,03752
2	28,19	24,40	423,50	15,02306
3	31,07	30,00	465,12	14,97007
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>15,01021</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>15 010,21</b>
<b>TOMA DE DATOS 2</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
1	37,85	35,30	504,86	13,33844
2	38,22	35,80	508,62	13,30769
3	37,90	35,40	505,61	13,34063
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>13,32892</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>13 328,92</b>
<b>TOMA DE DATOS 3</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
1	43,75	35,50	506,36	11,57394
2	42,94	34,40	498,09	11,59967
3	43,54	35,20	504,11	11,57809
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>11,58390</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>11 583,90</b>
<b>TOMA DE DATOS 4</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
1	54,75	34,80	501,1	9,15251
2	54,34	34,60	499,59	9,19378
3	54,22	34,50	498,84	9,20030
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>9,18220</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>9 182,20</b>
<b>TOMA DE DATOS 5</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
1	62,09	34,10	495,83	7,98567
2	62,69	34,70	500,34	7,98118
3	62,44	34,20	496,58	7,95291
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>7,97325</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>7 973,25</b>

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XIX. Tirante del flujo empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal**

Sección	Longitud acumulada (cm)	y seco (cm)	TOMA DE DATOS 1		TOMA DE DATOS 2		TOMA DE DATOS 3		TOMA DE DATOS 4		TOMA DE DATOS 5	
			y mojado (cm)	y (cm)	y mojado (cm)	y (cm)	y mojado (cm)	y (cm)	y mojado (cm)	y (cm)	y mojado (cm)	y (cm)
1	0,00	27,50	53,20	25,70	52,50	25,00	52,00	24,50	51,10	23,60	50,60	23,10
2	10,00	27,50	53,20	25,70	52,50	25,00	52,00	24,50	51,10	23,60	50,60	23,10
3	20,00	27,50	53,15	25,65	52,50	25,00	51,95	24,45	51,10	23,60	50,55	23,05
4	25,00	27,50	53,10	25,60	52,50	25,00	51,90	24,40	51,10	23,60	50,50	23,00
5	30,00	30,80	53,00	22,20	52,40	21,60	51,85	21,05	51,00	20,20	50,50	19,70
6	35,00	35,40	52,80	17,40	52,20	16,80	51,70	16,30	50,90	15,50	50,40	15,00
7	40,00	40,60	52,40	11,80	51,85	11,25	51,40	10,80	50,70	10,10	50,15	9,55
8	45,00	45,20	51,50	6,30	50,95	5,75	50,45	5,25	49,70	4,50	49,30	4,10
9	50,00	43,30	49,40	6,10	48,80	5,50	48,40	5,10	47,60	4,30	47,10	3,80
10	55,00	41,10	46,10	5,00	45,55	4,45	45,20	4,10	44,50	3,40	44,10	3,00
11	60,00	39,10	43,20	4,10	42,80	3,70	42,60	3,50	42,05	2,95	41,70	2,60
12	65,00	37,00	40,75	3,75	40,40	3,40	40,30	3,30	39,80	2,80	39,50	2,50
13	70,00	35,00	38,40	3,40	38,10	3,10	38,10	3,10	37,60	2,60	37,30	2,30
14	75,00	33,00	36,30	3,30	36,00	3,00	35,90	2,90	35,55	2,55	35,30	2,30
15	80,00	31,00	34,15	3,15	33,90	2,90	33,90	2,90	33,50	2,50	33,30	2,30
16	85,00	29,20	32,30	3,10	32,00	2,80	32,00	2,80	31,60	2,40	31,40	2,20
17	90,00	27,50	30,90	3,40	30,60	3,10	30,65	3,15	30,25	2,75	30,00	2,50
18	95,00	27,50	30,30	2,80	30,00	2,50	29,85	2,35	29,50	2,00	29,30	1,80
19	100,00	27,50	30,20	2,70	29,95	2,45	29,70	2,20	29,40	1,90	29,20	1,70

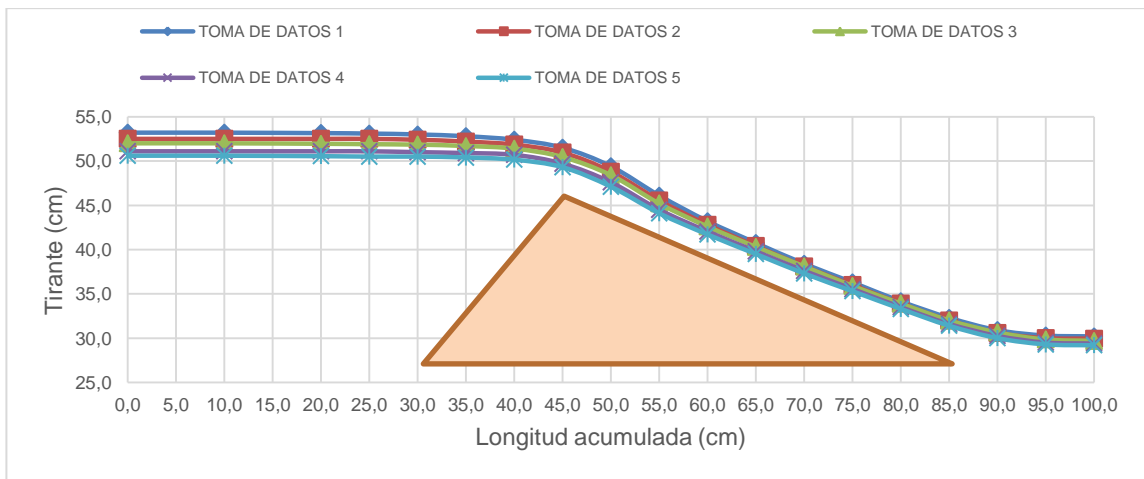
Fuente: elaboración propia.

Figura 66. Perfil del flujo sobre el prisma triangular que modifica el fondo del canal



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 67. Perfil del flujo sobre el prisma triangular que modifica el fondo del canal para las cinco tomas de datos



Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Cálculos toma de datos 1 empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal**

<b>TOMA DE DATOS 1</b>								
<b>No</b>	<b>y (cm)</b>	<b>Ancho (cm)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Velocidad (cm/s)</b>	<b>Caudal unitario (cm<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Froude</b>	<b>Tipo de flujo</b>	<b>Energía específica (cm)</b>
1	25,70	31,10	799,27	18,78	482,64	0,12	subcrítico	25,88
2	25,70	31,10	799,27	18,78	482,64	0,12	subcrítico	25,88
3	25,65	31,10	797,72	18,82	482,64	0,12	subcrítico	25,83
4	25,60	31,10	796,16	18,85	482,64	0,12	subcrítico	25,78
5	22,20	31,10	690,42	21,74	482,64	0,15	subcrítico	22,44
6	17,40	31,10	541,14	27,74	482,64	0,21	subcrítico	17,79
7	11,80	31,10	366,98	40,90	482,64	0,38	subcrítico	12,65
8	6,30	31,10	195,93	76,61	482,64	0,97	subcrítico	9,29
9	6,10	31,10	189,71	79,12	482,64	1,02	supercrítico	9,29
10	5,00	31,10	155,50	96,53	482,64	1,38	supercrítico	9,75
11	4,10	31,10	127,51	117,72	482,64	1,86	supercrítico	11,16
12	3,75	31,10	116,63	128,70	482,64	2,12	supercrítico	12,19
13	3,40	31,10	105,74	141,95	482,64	2,46	supercrítico	13,67
14	3,30	31,10	102,63	146,26	482,64	2,57	supercrítico	14,20
15	3,15	31,10	97,97	153,22	482,64	2,76	supercrítico	15,12
16	3,10	31,10	96,41	155,69	482,64	2,82	supercrítico	15,45
17	3,40	31,10	105,74	141,95	482,64	2,46	supercrítico	13,67
18	2,80	31,10	87,08	172,37	482,64	3,29	supercrítico	17,94
19	2,70	31,10	83,97	178,76	482,64	3,47	supercrítico	18,99

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Cálculos toma de datos 2 empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal**

TOMA DE DATOS 2								
No	y (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Velocidad (cm/s)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	Froude	Tipo de flujo	Energía específica (cm)
1	25,00	31,10	777,50	17,14	428,58	0,11	subcrítico	25,15
2	25,00	31,10	777,50	17,14	428,58	0,11	subcrítico	25,15
3	25,00	31,10	777,50	17,14	428,58	0,11	subcrítico	25,15
4	25,00	31,10	777,50	17,14	428,58	0,11	subcrítico	25,15
5	21,60	31,10	671,76	19,84	428,58	0,14	subcrítico	21,80
6	16,80	31,10	522,48	25,51	428,58	0,20	subcrítico	17,13
7	11,25	31,10	349,88	38,10	428,58	0,36	subcrítico	11,99
8	5,75	31,10	178,83	74,54	428,58	0,99	subcrítico	8,58
9	5,50	31,10	171,05	77,92	428,58	1,06	supercrítico	8,59
10	4,45	31,10	138,40	96,31	428,58	1,46	supercrítico	9,18
11	3,70	31,10	115,07	115,83	428,58	1,92	supercrítico	10,54
12	3,40	31,10	105,74	126,05	428,58	2,18	supercrítico	11,50
13	3,10	31,10	96,41	138,25	428,58	2,51	supercrítico	12,84
14	3,00	31,10	93,30	142,86	428,58	2,63	supercrítico	13,40
15	2,90	31,10	90,19	147,79	428,58	2,77	supercrítico	14,03
16	2,80	31,10	87,08	153,07	428,58	2,92	supercrítico	14,74
17	3,10	31,10	96,41	138,25	428,58	2,51	supercrítico	12,84
18	2,50	31,10	77,75	171,43	428,58	3,46	supercrítico	17,48
19	2,45	31,10	76,20	174,93	428,58	3,57	supercrítico	18,05

Fuente: elaboración propia.



Tabla XXII. **Cálculos toma de datos 3 empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal**

TOMA DE DATOS 3								
No	y (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Velocidad (cm/s)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	Froude	Tipo de flujo	Energía específica (cm)
1	24,50	31,10	761,95	15,20	372,47	0,10	subcrítico	24,62
2	24,50	31,10	761,95	15,20	372,47	0,10	subcrítico	24,62
3	24,45	31,10	760,40	15,23	372,47	0,10	subcrítico	24,57
4	24,40	31,10	758,84	15,27	372,47	0,10	subcrítico	24,52
5	21,05	31,10	654,66	17,69	372,47	0,12	subcrítico	21,21
6	16,30	31,10	506,93	22,85	372,47	0,18	subcrítico	16,57
7	10,80	31,10	335,88	34,49	372,47	0,34	subcrítico	11,41
8	5,25	31,10	163,28	70,95	372,47	0,99	subcrítico	7,82
9	5,10	31,10	158,61	73,03	372,47	1,03	supercrítico	7,82
10	4,10	31,10	127,51	90,85	372,47	1,43	supercrítico	8,31
11	3,50	31,10	108,85	106,42	372,47	1,82	supercrítico	9,27
12	3,30	31,10	102,63	112,87	372,47	1,98	supercrítico	9,79
13	3,10	31,10	96,41	120,15	372,47	2,18	supercrítico	10,46
14	2,90	31,10	90,19	128,44	372,47	2,41	supercrítico	11,31
15	2,90	31,10	90,19	128,44	372,47	2,41	supercrítico	11,31
16	2,80	31,10	87,08	133,03	372,47	2,54	supercrítico	11,82
17	3,15	31,10	97,97	118,25	372,47	2,13	supercrítico	10,28
18	2,35	31,10	73,09	158,50	372,47	3,30	supercrítico	15,15
19	2,20	31,10	68,42	169,31	372,47	3,64	supercrítico	16,81

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Cálculos toma de datos 4 empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal**

TOMA DE DATOS 4								
No	y (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Velocidad (cm/s)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	Froude	Tipo de flujo	Energía específica (cm)
1	23,60	31,10	733,96	12,51	295,25	0,08	subcrítico	23,68
2	23,60	31,10	733,96	12,51	295,25	0,08	subcrítico	23,68
3	23,60	31,10	733,96	12,51	295,25	0,08	subcrítico	23,68
4	23,60	31,10	733,96	12,51	295,25	0,08	subcrítico	23,68
5	20,20	31,10	628,22	14,62	295,25	0,10	subcrítico	20,31
6	15,50	31,10	482,05	19,05	295,25	0,15	subcrítico	15,68
7	10,10	31,10	314,11	29,23	295,25	0,29	subcrítico	10,54
8	4,50	31,10	139,95	65,61	295,25	0,99	subcrítico	6,69
9	4,30	31,10	133,73	68,66	295,25	1,06	supercrítico	6,70
10	3,40	31,10	105,74	86,84	295,25	1,50	supercrítico	7,24
11	2,95	31,10	91,74	100,08	295,25	1,86	supercrítico	8,06
12	2,80	31,10	87,08	105,45	295,25	2,01	supercrítico	8,47
13	2,60	31,10	80,86	113,56	295,25	2,25	supercrítico	9,17
14	2,55	31,10	79,30	115,78	295,25	2,31	supercrítico	9,38
15	2,5	31,10	77,75	118,10	295,25	2,38	supercrítico	9,61
16	2,4	31,10	74,64	123,02	295,25	2,54	supercrítico	10,11
17	2,75	31,10	85,53	107,36	295,25	2,07	supercrítico	8,63
18	2	31,10	62,20	147,62	295,25	3,33	supercrítico	13,11
19	1,9	31,10	59,09	155,39	295,25	3,60	supercrítico	14,21

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Cálculos toma de datos 5 empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal**

TOMA DE DATOS 5								
No	y (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Velocidad (cm/s)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	Froude	Tipo de flujo	Energía específica (cm)
1	23,10	31,10	718,41	11,10	256,37	0,07	subcrítico	23,16
2	23,10	31,10	718,41	11,10	256,37	0,07	subcrítico	23,16
3	23,05	31,10	716,86	11,12	256,37	0,07	subcrítico	23,11
4	23,00	31,10	715,30	11,15	256,37	0,07	subcrítico	23,06
5	19,70	31,10	612,67	13,01	256,37	0,09	subcrítico	19,79
6	15,00	31,10	466,50	17,09	256,37	0,14	subcrítico	15,15
7	9,55	31,10	297,01	26,85	256,37	0,28	subcrítico	9,92
8	4,10	31,10	127,51	62,53	256,37	0,99	subcrítico	6,09
9	3,80	31,10	118,18	67,47	256,37	1,11	supercrítico	6,12
10	3,00	31,10	93,30	85,46	256,37	1,58	supercrítico	6,72
11	2,60	31,10	80,86	98,61	256,37	1,95	supercrítico	7,56
12	2,50	31,10	77,75	102,55	256,37	2,07	supercrítico	7,86
13	2,30	31,10	71,53	111,47	256,37	2,35	supercrítico	8,63
14	2,30	31,10	71,53	111,47	256,37	2,35	supercrítico	8,63
15	2,30	31,10	71,53	111,47	256,37	2,35	supercrítico	8,63
16	2,20	31,10	68,42	116,53	256,37	2,51	supercrítico	9,12
17	2,50	31,10	77,75	102,55	256,37	2,07	supercrítico	7,86
18	1,80	31,10	55,98	142,43	256,37	3,39	supercrítico	12,14
19	1,70	31,10	52,87	150,81	256,37	3,69	supercrítico	13,29

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XXV. Tirantes críticos teóricos empleando el prisma triangular que modifica el fondo del canal**

<b>Tirante crítico <math>y_c</math> (cm)</b>	
<b>TOMA DE DATOS 1</b>	6,19
<b>TOMA DE DATOS 2</b>	5,72
<b>TOMA DE DATOS 3</b>	5,21
<b>TOMA DE DATOS 4</b>	4,46
<b>TOMA DE DATOS 5</b>	4,06

Fuente: elaboración propia.

Se debe resaltar que el tirante crítico se encuentra en todas las tomas de datos entre la sección 8 y 9, tal como se observa que entre dichos dos valores del número de Froude se encuentra el cambio entre flujo subcrítico y supercrítico. El valor más cercano al número Froude = 1 sucede en la sección 8 dado que esta es la cúspide del prisma triangular.

### **3.2.5.2. Resultados del ensayo de energía específica empleando la reducción que modifica el ancho del canal**

Empleando las ecuaciones anteriores se realizan los cálculos correspondientes para cada una de las tomas de datos de la reducción que modifica el ancho del canal y se presentan los resultados en las siguientes tablas:

Tabla XXVI. Caudales obtenidos empleando la reducción que modifica el ancho del canal

<b>TOMA DE DATOS 1</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
1	25,19	23,90	419,80	16,66534
2	28,09	30,30	467,36	16,63795
3	28,00	30,10	465,87	16,63821
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>16,64717</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>16 647,17</b>
<b>TOMA DE DATOS 2</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
1	32,37	30,80	471,10	14,55360
2	33,35	32,70	485,32	14,55232
3	32,78	31,50	476,33	14,53112
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>14,54568</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>14 545,68</b>
<b>TOMA DE DATOS 3</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
1	38,07	32,10	480,83	12,63015
2	38,03	32,20	481,57	12,66290
3	39,81	35,10	503,35	12,64381
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>12,64562</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>12 645,62</b>
<b>TOMA DE DATOS 4</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
1	50,78	30,30	467,36	9,20362
2	51,32	30,80	471,10	9,17966
3	52,00	31,60	477,08	9,17462
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>9,18597</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>9 185,97</b>
<b>TOMA DE DATOS 5</b>				
<b>Aforo</b>	<b>t (s)</b>	<b>h<sub>p</sub> (cm)</b>	<b>V (l)</b>	<b>Q (l/s)</b>
1	77,84	31,70	477,83	6,13862
2	76,75	30,70	470,35	6,12834
3	77,47	31,60	477,08	6,15825
<b>Q promedio (l/s)</b>				<b>6,14174</b>
<b>Q promedio (cm<sup>3</sup>/s)</b>				<b>6 141,74</b>

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XXVII. Tirante del flujo empleando la reducción que modifica el ancho del canal**

Sección	Longitud acumulada (cm)	y seco (cm)	TOMA DE DATOS 1		TOMA DE DATOS 2		TOMA DE DATOS 3		TOMA DE DATOS 4		TOMA DE DATOS 5	
			y mojado (cm)	y (cm)	y mojado (cm)	y (cm)	y mojado (cm)	y (cm)	y mojado (cm)	y (cm)	y mojado (cm)	y (cm)
1	0,00	26,60	39,20	12,60	38,20	11,60	37,15	10,55	35,20	8,60	33,25	6,65
2	10,00	26,70	39,20	12,50	38,10	11,40	37,10	10,40	35,15	8,45	33,25	6,55
3	15,00	26,70	39,00	12,30	37,90	11,20	37,00	10,30	35,10	8,40	33,15	6,45
4	20,00	26,75	38,80	12,05	37,80	11,05	36,80	10,05	34,90	8,15	33,05	6,30
5	25,00	26,75	38,50	11,75	37,40	10,65	36,50	9,75	34,70	7,95	32,80	6,05
6	30,00	26,80	37,95	11,15	37,00	10,20	36,10	9,30	34,20	7,40	32,50	5,70
7	35,00	26,80	37,30	10,50	36,35	9,55	35,50	8,70	33,75	6,95	32,10	5,30
8	40,00	26,80	36,45	9,65	35,55	8,75	34,80	8,00	33,15	6,35	31,65	4,85
9	45,00	26,80	35,65	8,85	34,80	8,00	34,15	7,35	32,70	5,90	31,40	4,60
10	50,00	26,80	35,10	8,30	34,30	7,50	33,70	6,90	32,50	5,70	31,30	4,50
11	60,00	26,80	34,55	7,75	34,00	7,20	33,50	6,70	32,50	5,70	31,45	4,65
12	70,00	26,75	34,35	7,60	33,85	7,10	33,30	6,55	31,95	5,20	30,70	3,95
13	80,00	26,70	33,10	6,40	32,50	5,80	31,95	5,25	30,90	4,20	30,15	3,45
14	90,00	26,70	31,95	5,25	31,40	4,70	31,10	4,40	30,35	3,65	29,50	2,80
15	100,00	26,65	31,15	4,50	30,70	4,05	30,50	3,85	29,70	3,05	29,00	2,35
16	110,00	26,05	30,30	4,25	30,00	3,95	29,65	3,60	29,00	2,95	28,50	2,45

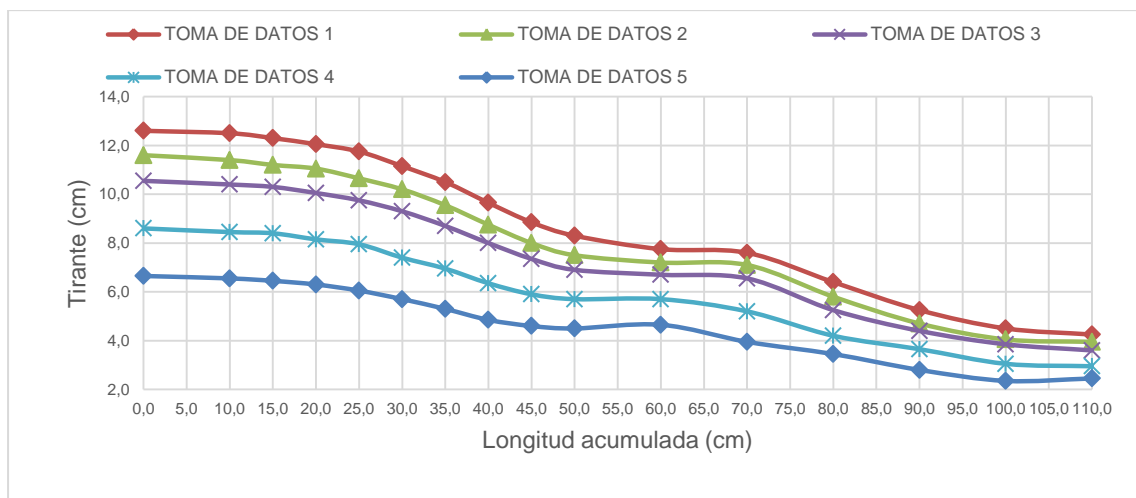
Fuente: elaboración propia.

Figura 68. Perfil del flujo en la reducción que modifica el ancho del canal



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 69. Perfil del flujo en la reducción que modifica el ancho del canal para las cinco tomas de datos



Fuente: elaboración propia.

**Tabla XXVIII. Cálculos toma de datos 1 empleando la reducción que modifica el ancho del canal**

<b>TOMA DE DATOS 1</b>								
<b>No</b>	<b>y (cm)</b>	<b>Ancho (cm)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Velocidad (cm/s)</b>	<b>Caudal unitario (cm<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Froude</b>	<b>Tipo de flujo</b>	<b>Energía específica (cm)</b>
1	12,60	30,10	379,26	43,89	553,06	0,39	subcrítico	13,58
2	12,50	30,10	376,25	44,24	553,06	0,40	subcrítico	13,50
3	12,30	29,40	361,62	46,03	566,23	0,42	subcrítico	13,38
4	12,05	26,90	324,15	51,36	618,85	0,47	subcrítico	13,39
5	11,75	24,00	282,00	59,03	693,63	0,55	subcrítico	13,53
6	11,15	20,80	231,92	71,78	800,34	0,69	subcrítico	13,78
7	10,50	19,60	205,80	80,89	849,35	0,80	subcrítico	13,83
8	9,65	19,40	187,21	88,92	858,10	0,91	subcrítico	13,68
9	8,85	19,40	171,69	96,96	858,10	1,04	supercrítico	13,64
10	8,30	19,40	161,02	103,39	858,10	1,15	supercrítico	13,75
11	7,75	19,20	148,80	111,88	867,04	1,28	supercrítico	14,13
12	7,60	19,40	147,44	112,91	858,10	1,31	supercrítico	14,10
13	6,40	21,80	139,52	119,32	763,63	1,51	supercrítico	13,66
14	5,25	24,90	130,73	127,34	668,56	1,77	supercrítico	13,52
15	4,50	27,80	125,10	133,07	598,82	2,00	supercrítico	13,53
16	4,25	30,00	127,50	130,57	554,91	2,02	supercrítico	12,94

Fuente: elaboración propia.



Tabla XXIX. Cálculos toma de datos 2 empleando la reducción que modifica el ancho del canal

TOMA DE DATOS 2								
No	y (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Velocidad (cm/s)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	Froude	Tipo de flujo	Energía específica (cm)
1	11,60	30,10	349,16	41,66	483,25	0,39	subcrítico	12,48
2	11,40	30,10	343,14	42,39	483,25	0,40	subcrítico	12,32
3	11,20	29,40	329,28	44,17	494,75	0,42	subcrítico	12,19
4	11,05	26,90	297,25	48,93	540,73	0,47	subcrítico	12,27
5	10,65	24,00	255,60	56,91	606,07	0,56	subcrítico	12,30
6	10,20	20,80	212,16	68,56	699,31	0,69	subcrítico	12,60
7	9,55	19,60	187,18	77,71	742,13	0,80	subcrítico	12,63
8	8,75	19,40	169,75	85,69	749,78	0,92	subcrítico	12,49
9	8,00	19,40	155,20	93,72	749,78	1,06	supercrítico	12,48
10	7,50	19,40	145,50	99,97	749,78	1,17	supercrítico	12,59
11	7,20	19,20	138,24	105,22	757,59	1,25	supercrítico	12,84
12	7,10	19,40	137,74	105,60	749,78	1,27	supercrítico	12,78
13	5,80	21,80	126,44	115,04	667,23	1,53	supercrítico	12,55
14	4,70	24,90	117,03	124,29	584,16	1,83	supercrítico	12,57
15	4,05	27,80	112,59	129,19	523,23	2,05	supercrítico	12,56
16	3,95	30,00	118,50	122,75	484,86	1,97	supercrítico	11,63

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Cálculos toma de datos 3 empleando la reducción que modifica el ancho del canal**

TOMA DE DATOS 3								
No	y (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Velocidad (cm/s)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	Froude	Tipo de flujo	Energía específica (cm)
1	10,55	30,10	317,56	39,82	420,12	0,39	subcrítico	11,36
2	10,40	30,10	313,04	40,40	420,12	0,40	subcrítico	11,23
3	10,30	29,40	302,82	41,76	430,12	0,42	subcrítico	11,19
4	10,05	26,90	270,35	46,78	470,10	0,47	subcrítico	11,17
5	9,75	24,00	234,00	54,04	526,90	0,55	subcrítico	11,24
6	9,30	20,80	193,44	65,37	607,96	0,68	subcrítico	11,48
7	8,70	19,60	170,52	74,16	645,18	0,80	subcrítico	11,50
8	8,00	19,40	155,20	81,48	651,84	0,92	subcrítico	11,38
9	7,35	19,40	142,59	88,69	651,84	1,04	supercrítico	11,36
10	6,90	19,40	133,86	94,47	651,84	1,15	supercrítico	11,45
11	6,70	19,20	128,64	98,30	658,63	1,21	supercrítico	11,63
12	6,55	19,40	127,07	99,52	651,84	1,24	supercrítico	11,60
13	5,25	21,80	114,45	110,49	580,07	1,54	supercrítico	11,47
14	4,40	24,90	109,56	115,42	507,86	1,76	supercrítico	11,19
15	3,85	27,80	107,03	118,15	454,88	1,92	supercrítico	10,96
16	3,6	30,00	108,00	117,09	421,52	1,97	supercrítico	10,59

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. Cálculos toma de datos 4 empleando la reducción que modifica el ancho del canal

TOMA DE DATOS 4								
No	y (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Velocidad (cm/s)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	Froude	Tipo de flujo	Energía específica (cm)
1	8,60	30,10	258,86	35,49	305,18	0,39	subcrítico	9,24
2	8,45	30,10	254,35	36,12	305,18	0,40	subcrítico	9,11
3	8,40	29,40	246,96	37,20	312,45	0,41	subcrítico	9,11
4	8,15	26,90	219,24	41,90	341,49	0,47	subcrítico	9,04
5	7,95	24,00	190,80	48,14	382,75	0,55	subcrítico	9,13
6	7,40	20,80	153,92	59,68	441,63	0,70	subcrítico	9,22
7	6,95	19,60	136,22	67,43	468,67	0,82	subcrítico	9,27
8	6,35	19,40	123,19	74,57	473,50	0,94	subcrítico	9,18
9	5,90	19,40	114,46	80,25	473,50	1,05	supercrítico	9,18
10	5,70	19,40	110,58	83,07	473,50	1,11	supercrítico	9,22
11	5,70	19,20	109,44	83,94	478,44	1,12	supercrítico	9,29
12	5,20	19,40	100,88	91,06	473,50	1,27	supercrítico	9,43
13	4,20	21,80	91,56	100,33	421,37	1,56	supercrítico	9,33
14	3,65	24,90	90,89	101,07	368,91	1,69	supercrítico	8,86
15	3,05	27,80	84,79	108,34	330,43	1,98	supercrítico	9,03
16	2,95	30,00	88,50	103,80	306,20	1,93	supercrítico	8,44

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. Cálculos toma de datos 5 empleando la reducción que modifica el ancho del canal

TOMA DE DATOS 5								
No	y (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Velocidad (cm/s)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	Froude	Tipo de flujo	Energía específica (cm)
1	6,65	30,10	200,17	30,68	204,04	0,38	subcrítico	7,13
2	6,55	30,10	197,16	31,15	204,04	0,39	subcrítico	7,04
3	6,45	29,40	189,63	32,39	208,90	0,41	subcrítico	6,98
4	6,30	26,90	169,47	36,24	228,32	0,46	subcrítico	6,97
5	6,05	24,00	145,20	42,30	255,91	0,55	subcrítico	6,96
6	5,70	20,80	118,56	51,80	295,28	0,69	subcrítico	7,07
7	5,30	19,60	103,88	59,12	313,35	0,82	subcrítico	7,08
8	4,85	19,40	94,09	65,28	316,58	0,95	subcrítico	7,02
9	4,60	19,40	89,24	68,82	316,58	1,02	supercrítico	7,01
10	4,50	19,40	87,30	70,35	316,58	1,06	supercrítico	7,02
11	4,65	19,20	89,28	68,79	319,88	1,02	supercrítico	7,06
12	3,95	19,40	76,63	80,15	316,58	1,29	supercrítico	7,22
13	3,45	21,80	75,21	81,66	281,73	1,40	supercrítico	6,85
14	2,80	24,90	69,72	88,09	246,66	1,68	supercrítico	6,76
15	2,35	27,80	65,33	94,01	220,93	1,96	supercrítico	6,85
16	2,45	30,00	73,50	83,56	204,72	1,70	supercrítico	6,01

Fuente: elaboración propia.

Se debe resaltar que el tirante crítico se encuentra en todas las tomas de datos entre la sección 8 y 9, tal como se observa que entre dichos dos valores del número de Froude se encuentra el cambio entre flujo subcrítico y supercrítico. El valor más cercano al número Froude = 1 sucede en la sección 9 dado que esta es la sección con menor ancho, es decir, la máxima reducción.

### 3.2.6. Gráficas de los ensayos de energía específica empleando el prisma que modifica el fondo del canal

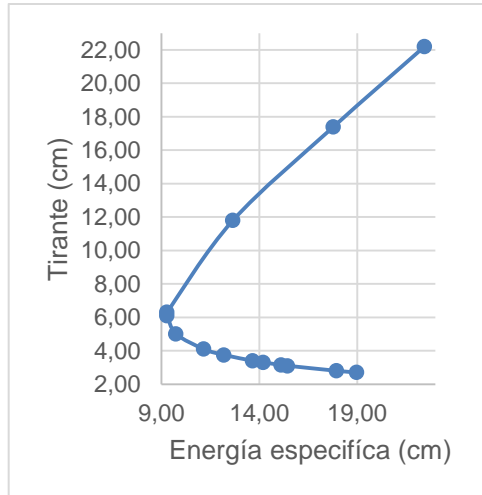
Con los datos calculados se presentan gráficos de energía específica para cada una de las tomas de datos, tomando valores para una mejor apreciación de la gráfica entre la sección 5 a la 19, se toman estas secciones porque de la sección 5 a la 16 son las lecturas en la que se encuentra el prisma. No se consideran los valores de las secciones 1 a la 4 por ser valores grandes y aproximadamente constantes que no permitirían la apreciación adecuada de la gráfica. Además, se excluye la sección 17 de la gráfica por ser una sección justo después de terminar el prisma en ella se presenta una pequeña elevación del tirante debido a la perturbación del final del prisma y esto también afecta la apreciación del gráfico.

Tabla XXXIII. Datos para gráficas de energía específica empleando el prisma que modifica el fondo del canal

Sección No.	TOMA DE DATOS 1		TOMA DE DATOS 2		TOMA DE DATOS 3		TOMA DE DATOS 4		TOMA DE DATOS 5	
	y (cm)	Energía específica (cm)	y (cm)	Energía específica (cm)	y (cm)	Energía específica (cm)	y (cm)	Energía específica (cm)	y (cm)	Energía específica (cm)
5	22,20	22,44	21,60	21,80	21,05	21,21	20,20	20,31	19,70	19,79
6	17,40	17,79	16,80	17,13	16,30	16,57	15,50	15,68	15,00	15,15
7	11,80	12,65	11,25	11,99	10,80	11,41	10,10	10,54	9,55	9,92
8	6,30	9,29	5,75	8,58	5,25	7,82	4,50	6,69	4,10	6,09
9	6,10	9,29	5,50	8,59	5,10	7,82	4,30	6,70	3,80	6,12
10	5,00	9,75	4,45	9,18	4,10	8,31	3,40	7,24	3,00	6,72
11	4,10	11,16	3,70	10,54	3,50	9,27	2,95	8,06	2,60	7,56
12	3,75	12,19	3,40	11,50	3,30	9,79	2,80	8,47	2,50	7,86
13	3,40	13,67	3,10	12,84	3,10	10,46	2,60	9,17	2,30	8,63
14	3,30	14,20	3,00	13,40	2,90	11,31	2,55	9,38	2,30	8,63
15	3,15	15,12	2,90	14,03	2,90	11,31	2,50	9,61	2,30	8,63
16	3,10	15,45	2,80	14,74	2,80	11,82	2,40	10,11	2,20	9,12
18	2,80	17,94	2,50	17,48	2,35	15,15	2,00	13,11	1,80	12,14
19	2,70	18,99	2,45	18,05	2,20	16,81	1,90	14,21	1,70	13,29

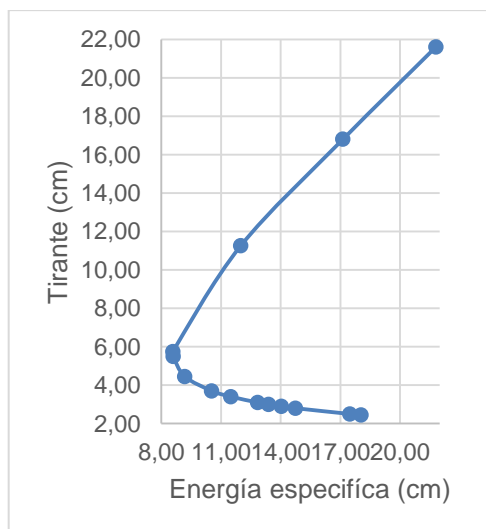
Fuente: elaboración propia.

Figura 70. **Gráfica de energía específica toma de datos 1 empleando el prisma que modifica el fondo del canal**



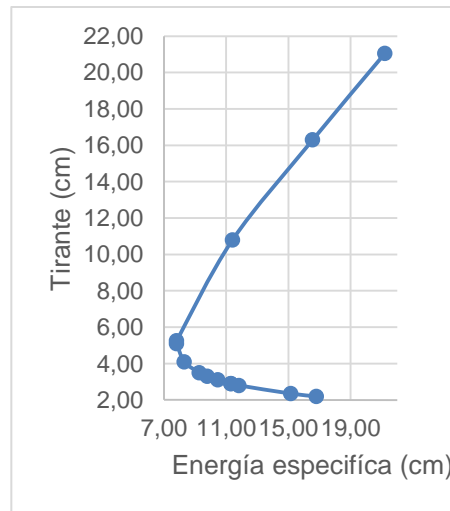
Fuente: elaboración propia.

Figura 71. **Gráfica de energía específica toma de datos 2 empleando el prisma que modifica el fondo del canal**



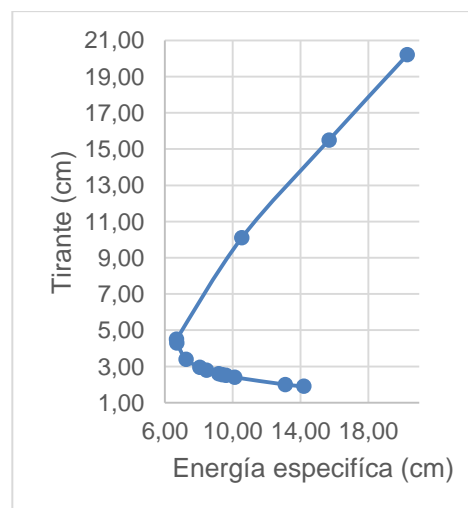
Fuente: elaboración propia.

Figura 72. **Gráfica de energía específica toma de datos 3 empleando el prisma que modifica el fondo del canal**



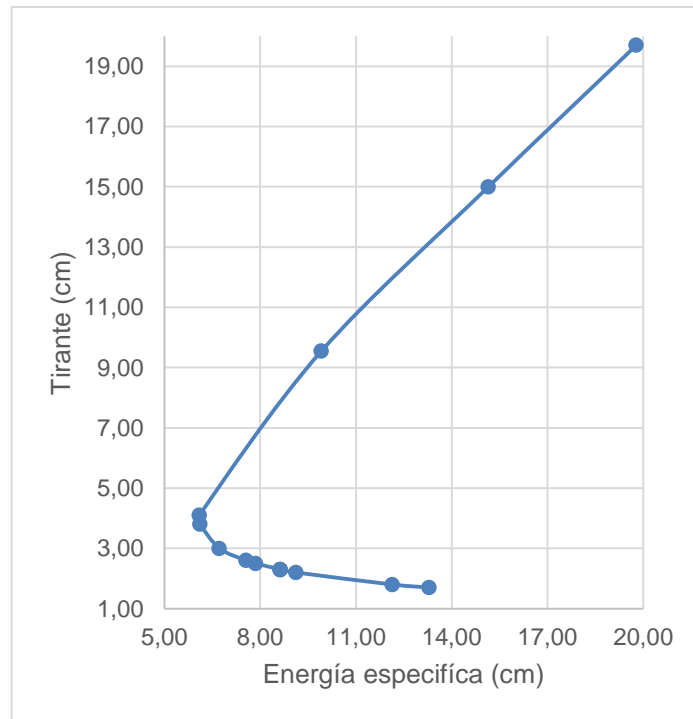
Fuente: elaboración propia.

Figura 73. **Gráfica de energía específica toma de datos 4 empleando el prisma que modifica el fondo del canal**



Fuente: elaboración propia.

Figura 74. **Gráfica de energía específica toma de datos 5 empleando el prisma que modifica el fondo del canal**

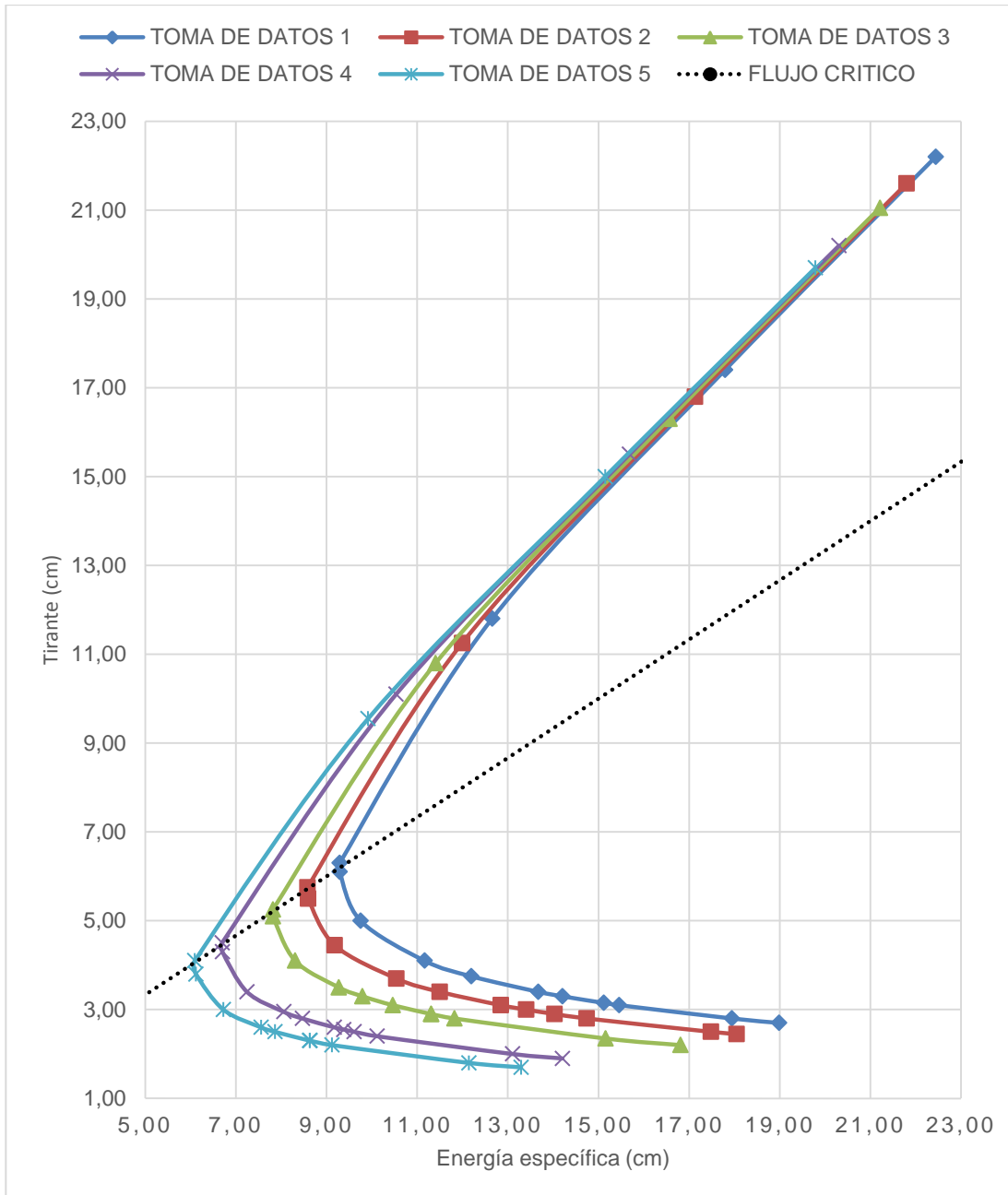


Fuente: elaboración propia.

Como comparativa se presentan las curvas de energía específica de las cinco tomas de datos en una sola figura, además, se incluye una línea punteada que indica el estado crítico del flujo para cada uno de los caudales analizados.



Figura 75. **Gráfica de comparación de energía específica de las cinco tomas de datos empleando el prisma que modifica el fondo del canal**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2.7. Gráficas de los ensayos de energía específica empleando la reducción que modifica el ancho del canal

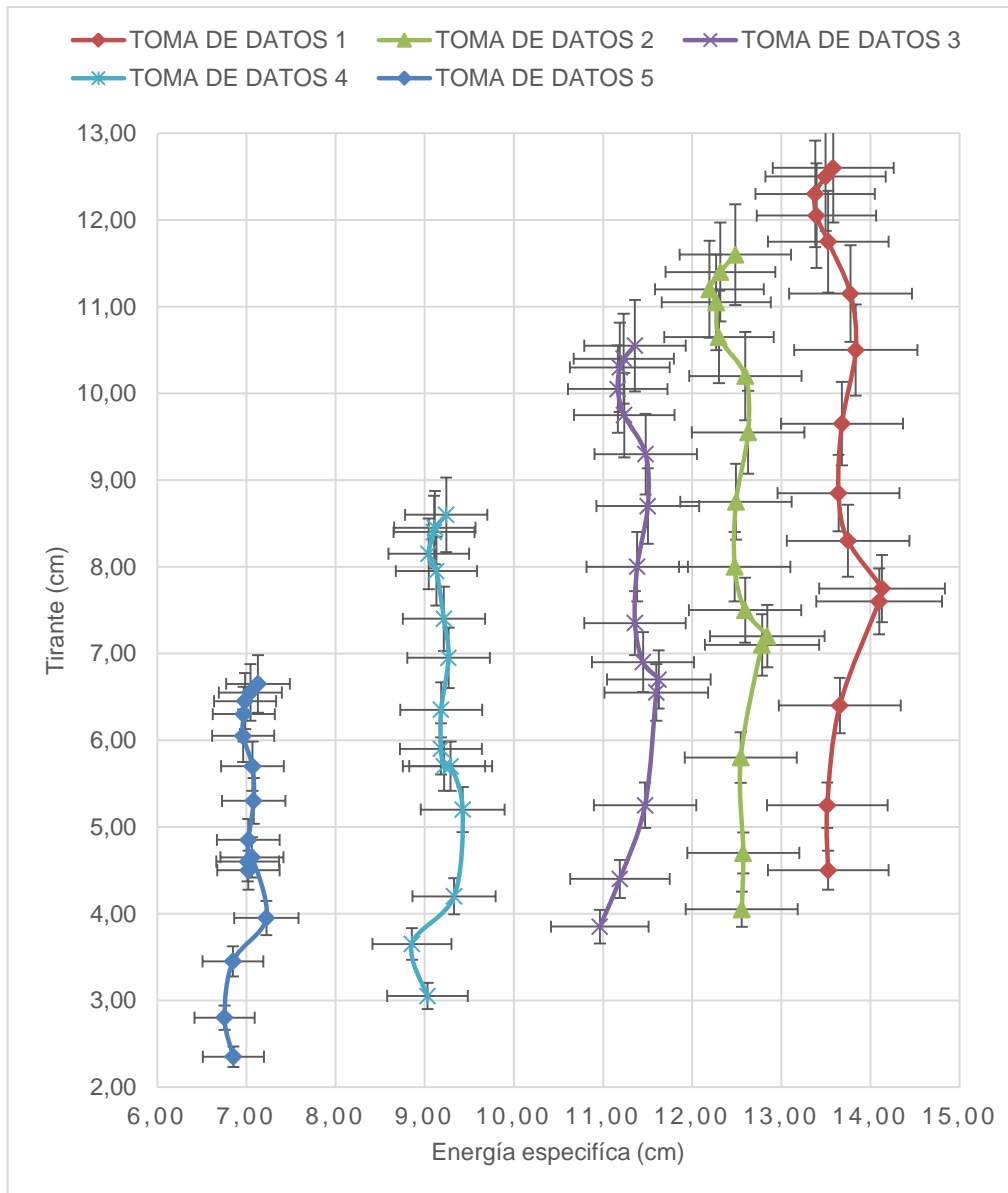
Con los datos calculados se presentan gráficos de energía específica para cada una de las tomas de datos. No se considera para las gráficas la sección 16 por ser un valor fuera de la reducción que modifica el ancho del canal.

Tabla XXXIV. Datos para gráficas de energía específica empleando la reducción que modifica el ancho del canal

Sección No.	TOMA DE DATOS 1		TOMA DE DATOS 2		TOMA DE DATOS 3		TOMA DE DATOS 4		TOMA DE DATOS 5	
	y (cm)	Energía específica (cm)	y (cm)	Energía específica (cm)	y (cm)	Energía específica (cm)	y (cm)	Energía específica (cm)	y (cm)	Energía específica (cm)
1	12,60	13,58	11,60	12,48	10,55	11,36	8,60	9,24	6,65	7,13
2	12,50	13,50	11,40	12,32	10,40	11,23	8,45	9,11	6,55	7,04
3	12,30	13,38	11,20	12,19	10,30	11,19	8,40	9,11	6,45	6,98
4	12,05	13,39	11,05	12,27	10,05	11,17	8,15	9,04	6,30	6,97
5	11,75	13,53	10,65	12,30	9,75	11,24	7,95	9,13	6,05	6,96
6	11,15	13,78	10,20	12,60	9,30	11,48	7,40	9,22	5,70	7,07
7	10,50	13,83	9,55	12,63	8,70	11,50	6,95	9,27	5,30	7,08
8	9,65	13,68	8,75	12,49	8,00	11,38	6,35	9,18	4,85	7,02
9	8,85	13,64	8,00	12,48	7,35	11,36	5,90	9,18	4,60	7,01
10	8,30	13,75	7,50	12,59	6,90	11,45	5,70	9,22	4,50	7,02
11	7,75	14,13	7,20	12,84	6,70	11,63	5,70	9,29	4,65	7,06
12	7,60	14,10	7,10	12,78	6,55	11,60	5,20	9,43	3,95	7,22
13	6,40	13,66	5,80	12,55	5,25	11,47	4,20	9,33	3,45	6,85
14	5,25	13,52	4,70	12,57	4,40	11,19	3,65	8,86	2,80	6,76
15	4,50	13,53	4,05	12,56	3,85	10,96	3,05	9,03	2,35	6,85

Fuente: elaboración propia.

Figura 76. **Gráfica de energía específica de las cinco tomas de datos empleando la reducción que modifica el ancho del canal**



Fuente: elaboración propia.

Las gráficas incluyen barras de error en ambas direcciones con un porcentaje de error del 5 %.

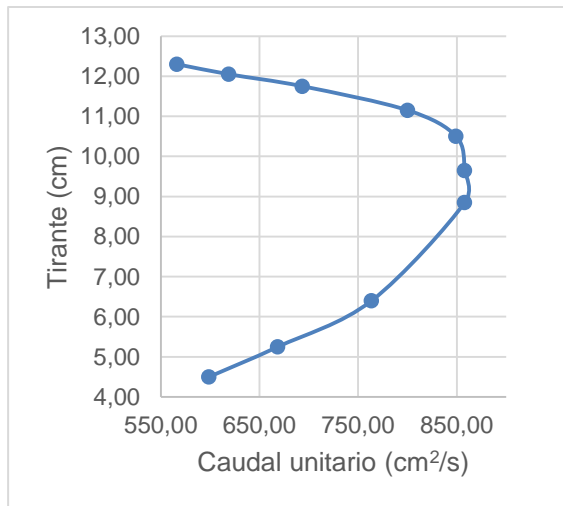
Con los datos calculados se presentan gráficos de tirante contra caudal unitario para cada una de las tomas de datos, tomando valores para una mejor apreciación de la gráfica entre la sección 3 a la 15, se toman estas secciones porque de la sección 3 a la 15 son las lecturas en la que se encuentra puramente la reducción del ancho del canal. No se consideran los valores de las secciones 1 y 2, ni de la sección 10 a la 12, por ser valores aproximadamente constantes que no permitirían la apreciación adecuada de la gráfica debido a que en dichas secciones el ancho de la reducción se mantiene constante.

Tabla XXXV. **Datos para gráficas de tirante contra caudal unitario empleando la reducción que modifica el ancho del canal**

Sección No.	TOMA DE DATOS 1		TOMA DE DATOS 2		TOMA DE DATOS 3		TOMA DE DATOS 4		TOMA DE DATOS 5	
	y (cm)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	y (cm)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	y (cm)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	y (cm)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)	y (cm)	Caudal unitario (cm <sup>2</sup> /s)
3	12,30	566,23	11,20	494,75	10,30	430,12	8,40	312,45	6,45	208,90
4	12,05	618,85	11,05	540,73	10,05	470,10	8,15	341,49	6,30	228,32
5	11,75	693,63	10,65	606,07	9,75	526,90	7,95	382,75	6,05	255,91
6	11,15	800,34	10,20	699,31	9,30	607,96	7,40	441,63	5,70	295,28
7	10,50	849,35	9,55	742,13	8,70	645,18	6,95	468,67	5,30	313,35
8	9,65	858,10	8,75	749,78	8,00	651,84	6,35	473,50	4,85	316,58
9	8,85	858,10	8,00	749,78	7,35	651,84	5,90	473,50	4,60	316,58
13	6,40	763,63	5,80	667,23	5,25	580,07	4,20	421,37	3,45	281,73
14	5,25	668,56	4,70	584,16	4,40	507,86	3,65	368,91	2,80	246,66
15	4,50	598,82	4,05	523,23	3,85	454,88	3,05	330,43	2,35	220,93

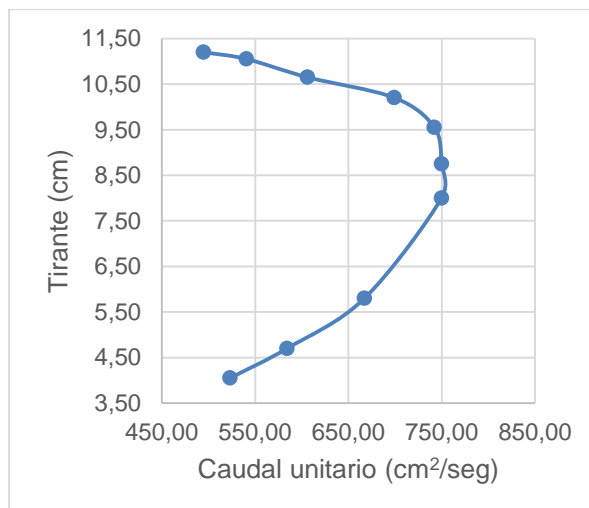
Fuente: elaboración propia.

Figura 77. **Gráfica de tirante contra caudal unitario toma de datos 1 empleando la reducción que modifica el ancho del canal**



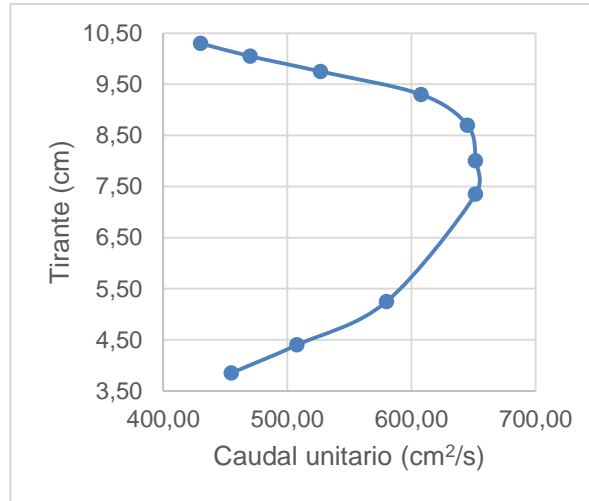
Fuente: elaboración propia.

Figura 78. **Gráfica de tirante contra caudal unitario toma de datos 2 empleando la reducción que modifica el ancho del canal**



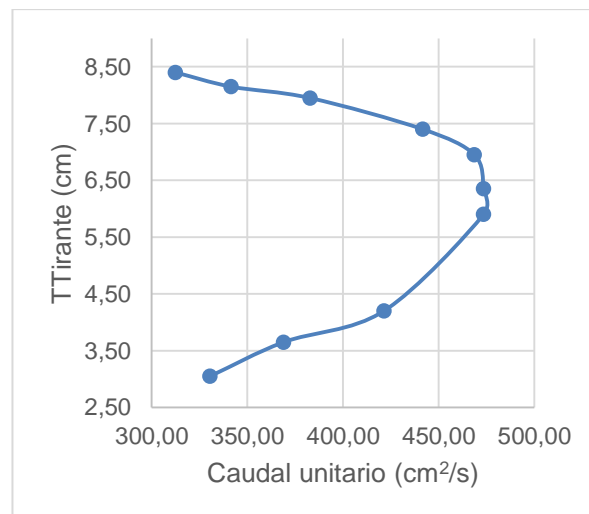
Fuente: elaboración propia.

Figura 79. **Gráfica de tirante contra caudal unitario toma de datos 3 empleando la reducción que modifica el ancho del canal**



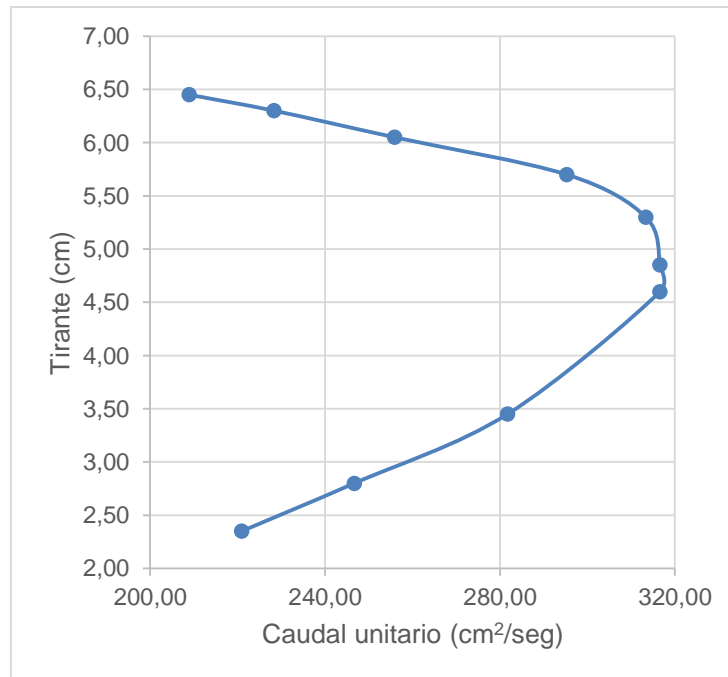
Fuente: elaboración propia.

Figura 80. **Gráfica de tirante contra caudal unitario toma de datos 4 empleando la reducción que modifica el ancho del canal**



Fuente: elaboración propia.

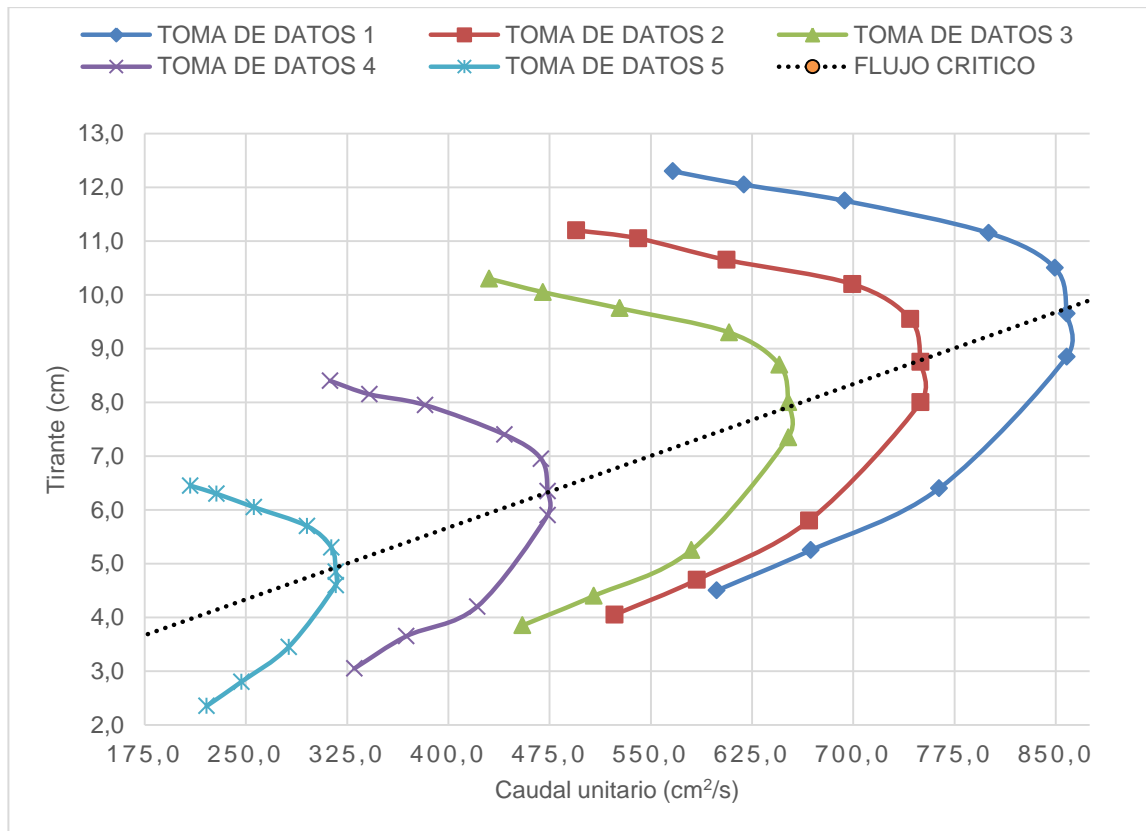
Figura 81. **Gráfica de tirante contra caudal unitario toma de datos 5 empleando la reducción que modifica el ancho del canal**



Fuente: elaboración propia.

Como comparativa se presentan las curvas de tirante contra caudal unitario de las cinco tomas de datos en una sola figura, además, se incluye una línea punteada que indica el estado crítico del flujo para cada uno de los caudales analizados.

Figura 82. **Gráfica de comparación de tirante contra caudal unitario de las cinco tomas de datos empleando la reducción que modifica el ancho del canal**



Fuente: elaboración propia.





## 4. INSTRUCTIVOS DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

### 4.1. Práctica de fuerza específica

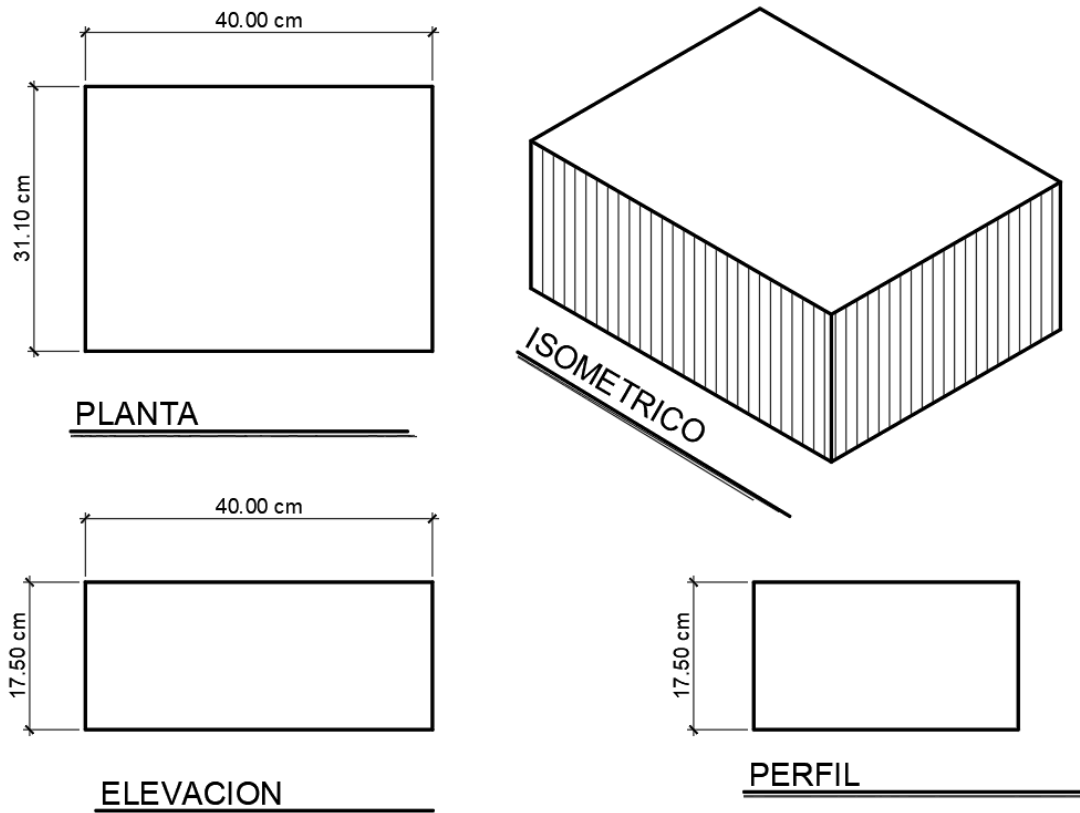
Objetivos:

- Analizar experimentalmente el comportamiento de la fuerza específica y el flujo crítico en canales abiertos para diferentes caudales.
- Graficar y analizar el comportamiento de curvas de tirante contra energía específica para diferentes caudales.
- Determinar la fuerza ejercida sobre la cara del prisma mediante la aplicación de los conceptos de fuerza específica.

Equipo:

- Prisma rectangular para estudio de la fuerza específica
- Canal hidrodinámico donde se colocará el prisma
- Bomba centrífuga que suministra flujo al canal
- Limnómetro con escala en centímetros
- Tanque volumétrico calibrado en litros, ubicado al final del canal hidrodinámico
- Cronómetro
- Cinta métrica

Figura 83. **Prisma rectangular para práctica de fuerza específica**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2019.

Procedimiento de la práctica:

- Fijar el prisma rectangular adecuadamente dentro del canal hidrodinámico y colocar plastilina en las orillas de las caras laterales para evitar filtraciones.
- Definir las secciones donde se medirían los tirantes a lo largo del canal antes del prisma y sobre él.

- Arrancar la bomba para suministrar flujo al canal y regular el flujo con la válvula de acuerdo a la altura de agua sobre el prisma y esperar a que se estabilice el flujo sobre el prisma.
- Tomar la lectura de los tirantes empleando el limnómetro.
- Medir el caudal con el método volumétrico de aforo tres veces.
- Variar el flujo estrangulando la válvula y repetir el procedimiento anterior hasta obtener 3 tomas de datos.

#### Cálculos y gráficas

- Calcular los caudales aforados en  $\text{cm}^3/\text{s}$  de cada toma de datos por el método volumétrico que consiste en dividir el volumen medido del tanque entre el tiempo transcurrido de llenado.

$$Q = \frac{V}{t}$$

- Obtener el promedio de los caudales aforados y así encontrar el caudal real para cada toma de datos, será el valor para los cálculos posteriores.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3}$$

- Determinar el tirante hidráulico en cm mediante la resta del tirante seco y mojado obtenidos en la toma de datos para cada toma de datos.

$$y = y_{mojado} - y_{seco}$$

- Calcular el caudal unitario ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) que circula en cada una de las tomas de datos.

$$q = \frac{Q_{promedio}}{b}$$

- Calcular el número de Froude e indicar a que régimen de flujo pertenecen las secciones analizadas para cada toma de datos.

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad \begin{cases} \text{si } F_R = 1 & \rightarrow \text{flujo crítico} \\ \text{si } F_R < 1 & \rightarrow \text{flujo subcrítico} \\ \text{si } F_R > 1 & \rightarrow \text{flujo supercrítico} \end{cases}$$

- Calcular la energía específica (cm), en las secciones analizadas para cada toma de datos.

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

- Calcular la fuerza específica (cm<sup>2</sup>), en las secciones analizadas para cada toma de datos.

$$M = \frac{q^2}{gy} + \frac{y^2}{2}$$

- Calcular el tirante crítico en cm para cada una de las tomas de datos.

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

- Identificar entre que secciones se presenta el tirante crítico para cada una de las tomas de datos.
- Determinar la fuerza por unidad de ancho (N/m), sobre la cara del prisma mediante la segunda ley de Newton para cada una de las tomas de datos.

$$P = \frac{\gamma h}{2}(2y_1 - h)$$

- Determinar la fuerza por unidad de ancho (N/m), sobre la cara del prisma mediante la presión hidrostática para cada una de las tomas de datos.

$$P = \frac{\gamma y_1^2}{2} - \frac{\gamma y_2^2}{2}$$

- Determinar la fuerza por unidad de ancho (N/m), sobre la cara del prisma mediante la ecuación de la cantidad de movimiento para cada una de las tomas de datos.

$$P = (M_1 - M_2) \gamma$$

- Realizar una comparación de las fuerzas por unidad de ancho obtenidas en la cara del prisma por los tres métodos de cálculo empleados para cada una de las tomas de datos.
- Utilizando la siguiente expresión calcular el caudal unitario para cada toma de datos y compararlo con el caudal unitario obtenido experimentalmente.

$$q = 0.5 \sqrt{\frac{2g y_1 y_2 (y_1^2 - 2h y_1 - y_2^2 + h^2)}{y_1 - y_2}}$$

- Comparar el comportamiento de la energía específica en la sección de control de entrada y salida del prisma rectangular para cada una de las tomas de datos.
- Graficar el perfil del flujo y compararlo con el perfil observado durante la práctica.
- Graficar y analizar el comportamiento del tirante contra la energía específica para cada una de las tomas de datos.
- Realizar una comparación de las gráficas de tirante contra la energía específica obtenidas para cada una de las tomas de datos.
- Graficar y analizar el comportamiento del tirante contra la fuerza específica para cada una de las tomas de datos.
- Realizar una comparación de las gráficas de tirante contra la fuerza específica obtenidas para cada una de las tomas de datos.

Tabla XXXVI. Cuadros para toma de datos para práctica de fuerza específica

TOMA DE DATOS 1				
Aforo	t (s)	h (cm)	V (l)	Q (l/s)
1				
2				
3				
Q promedio (l/s)				
Q promedio (cm <sup>3</sup> /s)				
TOMA DE DATOS 2				
Aforo	t (s)	h (cm)	V (l)	Q (l/s)
1				
2				
3				
Q promedio (l/s)				
Q promedio (cm <sup>3</sup> /s)				
TOMA DE DATOS 3				
Aforo	t (s)	h (cm)	V (l)	Q (l/s)
1				
2				
3				
Q promedio (l/s)				
Q promedio (cm <sup>3</sup> /s)				

Sección	longitud acumulada (cm)	TOMA DE DATOS 1			TOMA DE DATOS 2			TOMA DE DATOS 3		
		y mojado (cm)	y seco (cm)	Y (cm)	y mojado (cm)	y seco (cm)	Y (cm)	y mojado (cm)	y seco (cm)	Y (cm)
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Fuente: elaboración propia.

#### **4.2. Práctica de energía específica cuando se modifica el fondo del canal**

Objetivos:

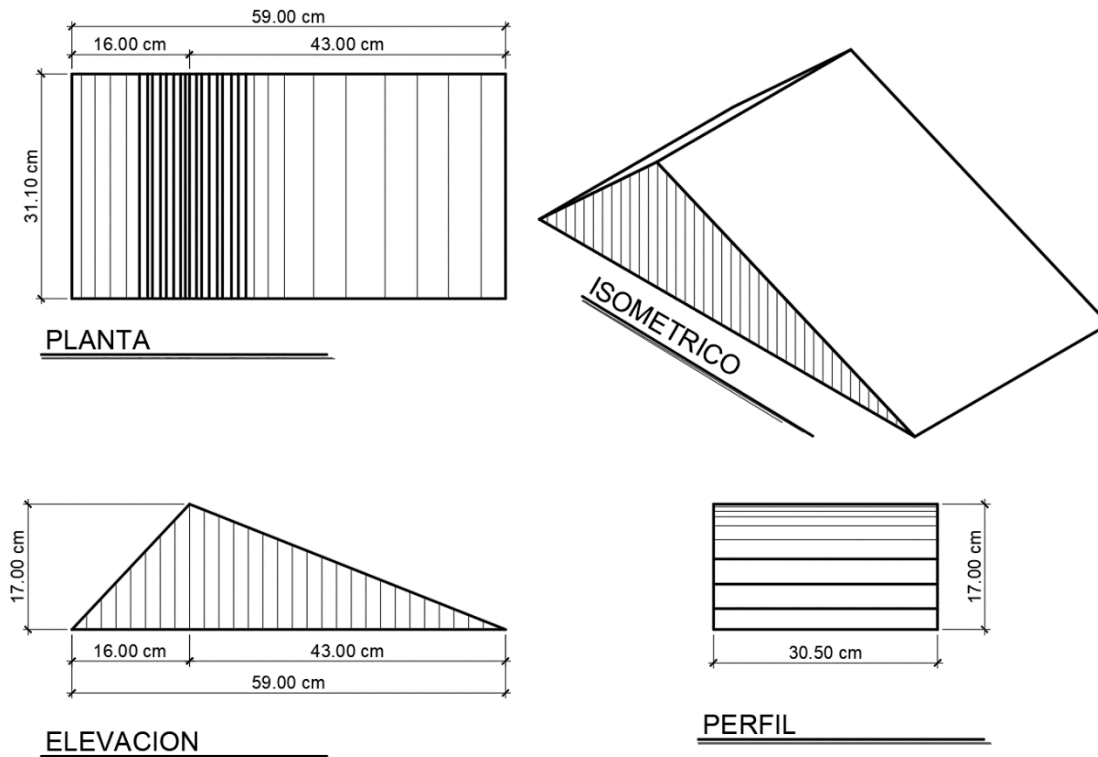
- Conocer los conceptos y principios hidráulicos de comportamiento del flujo sobre una estructura que modifica el fondo del canal.
- Analizar experimentalmente el comportamiento de la energía específica y el flujo crítico en canales abiertos para diferentes caudales cuando se modifica el fondo del mismo.
- Graficar y analizar el comportamiento de curvas de tirante contra energía específica para diferentes caudales cuando se modifica el fondo del mismo.

Equipo:

- Prisma triangular que modifica el fondo del canal
- Canal hidrodinámico donde se colocará el prisma
- Bomba centrífuga que suministra flujo al canal
- Limnómetro con escala en centímetros
- Tanque volumétrico calibrado en litros, ubicado al final del canal hidrodinámico.
- Cronómetro.
- Cinta métrica.



Figura 84. **Prisma triangular para práctica de energía específica cuando se modifica el fondo del canal**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2019.

Procedimiento de la práctica:

- Fijar el prisma triangular que modifica el fondo del canal adecuadamente
- Definir las secciones donde se medirían los tirantes a lo largo del canal antes, sobre y después del prisma. Una de las lecturas debe coincidir con el punto más alto de la estructura.
- Arrancar la bomba para suministrar flujo al canal y regular el flujo con la válvula de acuerdo a la altura de agua sobre el prisma y esperar a que se establezca el flujo sobre él.

- Tomar la lectura de los tirantes empleando el limnómetro cuya escala está en centímetros.
- Medir el caudal con el método volumétrico de aforo tres veces.
- Variar el flujo estrangulando la válvula y repetir el procedimiento anterior hasta obtener 3 tomas de datos.

Cálculos y gráficas:

- Calcular los caudales aforados en  $\text{cm}^3/\text{s}$  de cada toma de datos por el método volumétrico que consiste en dividir el volumen medido del tanque entre el tiempo transcurrido de llenado.

$$Q = \frac{V}{t}$$

- Obtener el promedio de los caudales aforados y así encontrar el caudal real para cada toma de datos, será el valor para los cálculos posteriores.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3}$$

- Determinar el tirante hidráulico en cm mediante la resta del tirante seco y mojado obtenidos en la toma de datos para cada toma de datos.

$$y = y_{mojado} - y_{seco}$$

- Calcular el caudal unitario ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) que circula en cada una de las tomas de datos.

$$q = \frac{Q_{promedio}}{b}$$

- Calcular el número de Froude e indicar a que régimen de flujo pertenecen las secciones analizadas para cada toma de datos.

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad \begin{cases} \text{si } F_R = 1 & \rightarrow \text{flujo crítico} \\ \text{si } F_R < 1 & \rightarrow \text{flujo subcrítico} \\ \text{si } F_R > 1 & \rightarrow \text{flujo supercrítico} \end{cases}$$

- Calcular la energía específica (cm) en las secciones analizadas para cada toma de datos.

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

- Calcular el tirante crítico en cm para cada una de las tomas de datos.

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

- Identificar entre que secciones se presenta el tirante crítico para cada una de las tomas de datos.
- Graficar el perfil del flujo y compararlo con el perfil observado durante la práctica.
- Graficar y analizar el comportamiento del tirante contra la energía específica para cada una de las tomas de datos.
- Realizar una comparación de las gráficas de tirante contra la energía específica obtenidas para cada una de las tomas de datos.

Tabla XXXVII. Cuadros para toma de datos para práctica de energía específica cuando se modifica el fondo del canal

TOMA DE DATOS 1				
Aforo	t (s)	h (cm)	V (l)	Q (l/s)
1				
2				
3				
Q promedio (l/s)				
Q promedio (cm <sup>3</sup> /s)				
TOMA DE DATOS 2				
Aforo	t (s)	h (cm)	V (l)	Q (l/s)
1				
2				
3				
Q promedio (l/s)				
Q promedio (cm <sup>3</sup> /s)				
TOMA DE DATOS 3				
Aforo	t (s)	h (cm)	V (l)	Q (l/s)
1				
2				
3				
Q promedio (l/s)				
Q promedio (cm <sup>3</sup> /s)				

Sección	longitud acumulada (cm)	TOMA DE DATOS 1			TOMA DE DATOS 2			TOMA DE DATOS 3		
		y mojado (cm)	y seco (cm)	Y (cm)	y mojado (cm)	y seco (cm)	Y (cm)	y mojado (cm)	y seco (cm)	Y (cm)
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Fuente: elaboración propia.

### **4.3. Práctica de energía específica cuando se modifica el ancho del canal**

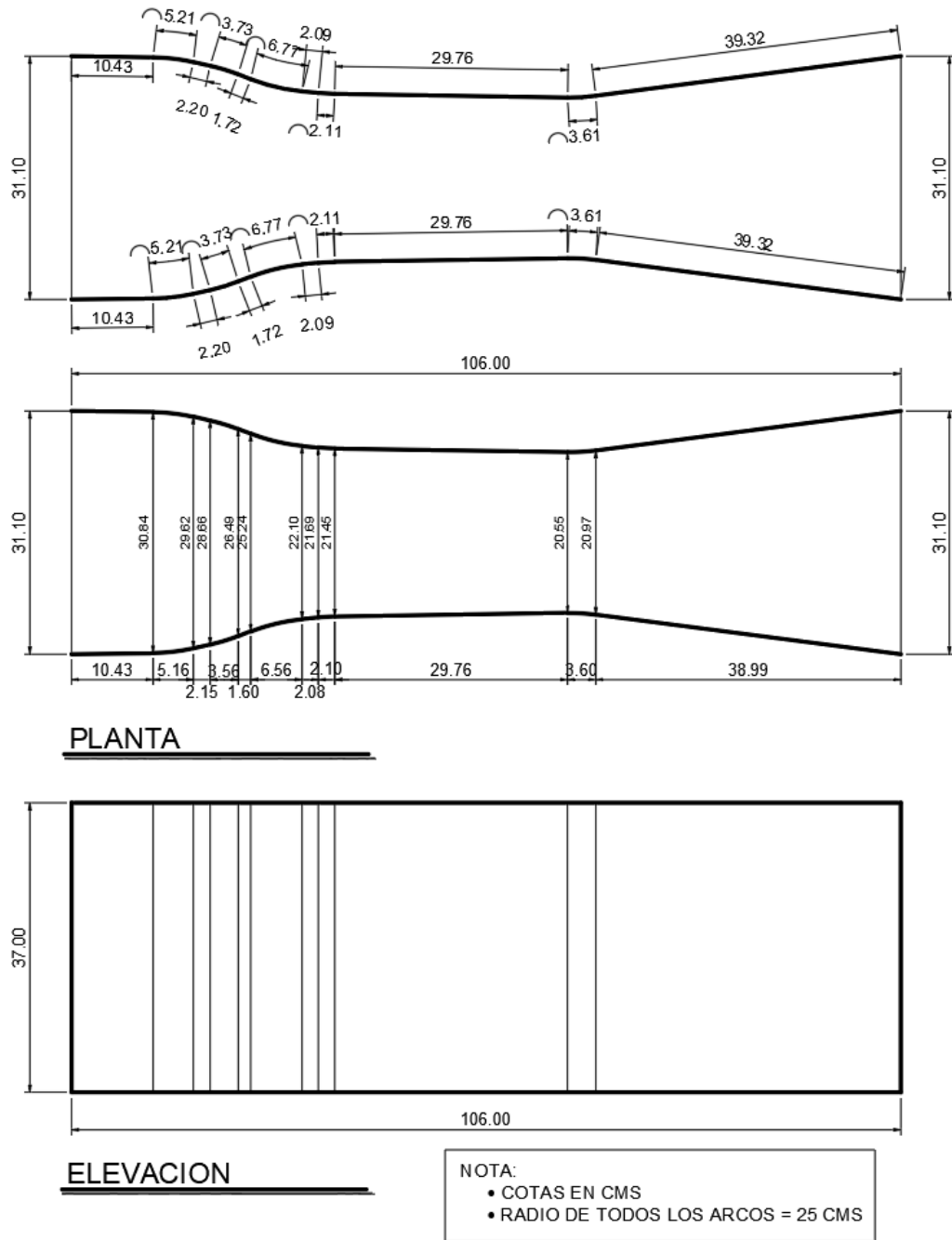
Objetivos:

- Conocer los conceptos y principios hidráulicos de comportamiento del flujo en una estructura que modifica el ancho del canal.
- Analizar experimentalmente el comportamiento de la energía específica y el flujo crítico en canales abiertos para diferentes caudales cuando se modifica el ancho del mismo.
- Graficar y analizar el comportamiento de curvas de tirante contra energía específica para diferentes caudales cuando se modifica el ancho del mismo.
- Graficar y analizar el comportamiento de curvas de tirante contra caudal unitario para diferentes caudales cuando se modifica el ancho del mismo.

Equipo:

- Reducción que modifica el ancho del canal
- Canal hidrodinámico donde se colocara la reducción
- Bomba centrífuga que suministra flujo al canal
- Limnómetro con escala en centímetros
- Tanque volumétrico calibrado en litros, ubicado al final del canal hidrodinámico.
- Cronómetro.
- Cinta métrica.

Figura 85. Reducción para práctica de energía específica cuando se modifica el ancho del canal



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2019.

Procedimiento de la práctica:

- Fijar la estructura que modifica el ancho del canal adecuadamente, colocar plastilina en las orillas de las caras laterales y cinta en la base para evitar filtraciones.
- Definir las secciones donde se medirían los tirantes a lo largo de la estructura, como mínimo 10 secciones.
- Arrancar la bomba para suministrar flujo al canal y regular el flujo con la válvula de acuerdo a la altura del tirante a la entrada de la estructura y esperar a que se estabilice el flujo.
- Tomar la lectura de los tirantes empleando el limnómetro cuya escala está en centímetros. También tomar lectura del ancho en cada sección.
- Medir el caudal con el método volumétrico de aforo tres veces.
- Variar el flujo estrangulando la válvula y repetir el procedimiento anterior hasta obtener 5 tomas de datos.

Cálculos y gráficas

- Calcular los caudales aforados en  $\text{cm}^3/\text{s}$  de cada toma de datos por el método volumétrico que consiste en dividir el volumen medido del tanque entre el tiempo transcurrido de llenado.

$$Q = \frac{V}{t}$$

- Obtener el promedio de los caudales aforados y así encontrar el caudal real para cada toma de datos, será el valor para los cálculos posteriores.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3}$$

- Determinar el tirante hidráulico en cm mediante la resta del tirante seco y mojado, obtenidos en la toma de datos para cada toma de datos.

$$y = y_{\text{mojado}} - y_{\text{seco}}$$

- Calcular el caudal unitario ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) que circula en las secciones analizadas para cada toma de datos.

$$q = \frac{Q_{\text{promedio}}}{b}$$

- Calcular el número de Froude e indicar a que régimen de flujo pertenecen las secciones analizadas para cada toma de datos.

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad \begin{cases} \text{si } F_R = 1 & \rightarrow \text{flujo crítico} \\ \text{si } F_R < 1 & \rightarrow \text{flujo subcrítico} \\ \text{si } F_R > 1 & \rightarrow \text{flujo supercrítico} \end{cases}$$

- Calcular la energía específica (cm) en las secciones analizadas para cada toma de datos.

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

- Identificar entre qué secciones se presenta el tirante crítico para cada una de las tomas de datos.
- Graficar el perfil del flujo y compararlo con el perfil observado durante la práctica.
- Graficar y analizar el comportamiento del tirante contra la energía específica para cada una de las tomas de datos.
- Graficar y analizar el comportamiento del tirante contra caudal unitario para cada una de las tomas de datos.
- Realizar una comparación de las gráficas de tirante contra caudal unitario obtenidas para cada una de las tomas de datos.



Tabla XXXVIII. Cuadros para toma de datos para práctica de energía específica cuando se modifica el ancho del canal

TOMA DE DATOS 1				
Aforo	t (s)	h (cm)	V (l)	Q (l/s)
1				
2				
3				
Q promedio (l/s)				
Q promedio (cm <sup>3</sup> /s)				
TOMA DE DATOS 2				
Aforo	t (s)	h (cm)	V (l)	Q (l/s)
1				
2				
3				
Q promedio (l/s)				
Q promedio (cm <sup>3</sup> /s)				
TOMA DE DATOS 3				
Aforo	t (s)	h (cm)	V (l)	Q (l/s)
1				
2				
3				
Q promedio (l/s)				
Q promedio (cm <sup>3</sup> /s)				

Sección	longitud acumulada (cm)	TOMA DE DATOS 1			TOMA DE DATOS 2			TOMA DE DATOS 3		
		y mojado (cm)	y seco (cm)	Y (cm)	y mojado (cm)	y seco (cm)	Y (cm)	y mojado (cm)	y seco (cm)	Y (cm)
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. Los modelos construidos para el estudio de la energía específica y fuerza específica se comportaron de acuerdo a los fundamentos teóricos establecidos de acuerdo a su forma geométrica y permitió el análisis de los fenómenos estudiados en esta investigación.
2. Cuando se emplean estructuras que modifican el fondo del canal en los que se varía la pendiente de una positiva a una negativa en el cambio entre ambas se presentará flujo crítico, siempre y cuando las pendientes superen la pendiente crítica. Por aparte cuando se emplean estructuras que modifican el ancho del canal provocando una reducción, el flujo crítico se presentará en la sección de máxima reducción siempre y cuando esta sea mayor al ancho crítico que provoque el cambio de regímenes de flujo.
3. En el ensayo se demostró que cuando solamente se modifica el fondo de un canal manteniendo el caudal constante, el caudal unitario se mantiene constante, mientras que la energía específica varía, además en la sección de máxima elevación se genera el flujo crítico y la energía específica mínima como se muestra en el gráfico 74. El comportamiento de las gráficas de energía específica y fuerza específica con caudal constante, al aumentar el caudal estas se desplazan hacia arriba y hacia la derecha del plano coordenado.
4. En el ensayo se demostró que cuando solo se modifica el ancho del canal generando una reducción que hace variar el caudal unitario que circula se genera que la energía específica sea aproximadamente constante como se muestra en el gráfico 75, y en la sección donde

sucede el flujo crítico se produce el caudal unitario máximo como se muestra en la figura 81. Además, el comportamiento de las gráficas de caudal unitario contra tirante con energía específica constante, al aumentar el caudal estas se desplazan hacia arriba y hacia la derecha del plano coordenado.

5. El estudio de la energía específica en las transiciones como lo son la elevación del fondo del canal o la reducción del ancho del mismo es importante, para conocer el comportamiento del régimen del flujo aguas arriba y debajo de la transición, con el fin de evitar el surgimiento de flujos no deseados que afecten el fin práctico del canal.
6. En el diseño de compuertas, vertederos, pilas de puentes o cualquier otra estructura que afecte el curso del flujo se debe analizar el efecto de la fuerza del fluido sobre el elemento, esto permitirá elegir la geometría adecuada y el material idóneo, para que no se presenten fallas en la estructura o el surgimiento de regímenes del flujo no deseados a lo largo del canal.
7. Por medio de los fundamentos teóricos y la toma de datos se plantea la ecuación 36 para la determinación del caudal unitario que pasa sobre un prisma rectangular que actúa como vertedero de pared gruesa, dicha ecuación genera caudales con un error relativo porcentual no mayor al 2 % con respecto al caudal que circula en el canal.
8. Con la información obtenida en los ensayos se elaboraron instructivos para realizar prácticas de laboratorio de los cursos de hidráulica e hidráulica de canales para la mejor comprensión de dichos fenómenos por los estudiantes.

## RECOMENDACIONES

1. Al montar las estructuras para el estudio de la fuerza específica y energía específica en el canal del laboratorio deben quedar perfectamente ajustados y evitar las filtraciones por debajo y en los laterales porque esto afecta el comportamiento del flujo. Si existieran filtraciones usa materiales impermeables como plastilina, foami y cinta de tela.
2. Para proceder a la lectura de tirantes en los experimentos es necesario que el flujo en el canal se estabilice, y se deben de tomar los tirantes secos antes de hacer circular el flujo, si se realiza su medición durante el ensayo perturba el flujo y afecta las lecturas posteriores de tirantes mojados.
3. Continuar con la investigación de la ecuación teórica para el cálculo del caudal unitario que circula sobre el prisma que funciona como vertedero de pared gruesa, para poder validar la ecuación y definir de mejor manera su porcentaje de variación con respecto al caudal que circula.
4. Es apropiado que para el diseño y construcción de transiciones en canales se analice la energía específica en la misma para no provocar cambios abruptos de regímenes del flujo, que afecten el uso práctico que se le desee dar al canal. En el diseño de estructuras que se interponen al flujo es necesario analizar la fuerza específica para cuantificar la fuerza del fluido que actuará sobre la estructura y así diseñarla para que esta no falle.

5. Dar a conocer los resultados de esta investigación a los estudiantes del curso de Hidráulica e Hidráulica de Canales, para que posean una guía que los ayude a analizar las características de los fenómenos expuestos de forma teórica y práctica, esto ayudará en su aprendizaje y comprensión de los temas de ambos cursos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. CADAVID R., Juan H. *Hidráulica de canales: fundamentos*. Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2006. 390 p.
2. CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, 1994. 667 p.
3. FRANZINI, Joseph B. y FINNEMORE, E. John. *Mecánica de fluidos*. 9a ed. Madrid, España: McGraw-Hill, 1999. 500 p.
4. FRENCH, Richard H. *Hidráulica de canales abiertos*. México: McGraw-Hill, 1988. 724 p.
5. LÓPEZ ÁNDRES, Lázaro. *Manual de Hidráulica*. España: Universidad de Alicante, 2004. 414 p.
6. RODRÍGUEZ DIAZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica experimental*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2001. 338 p.
7. SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica de canales*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2016. 836 p.
8. VILLÓN, Máximo G. *Hidráulica de canales*. 2a ed. Lima, Perú: Villón, 2007. 508 p.

